



**Guilherme Barreto Arez Coelho**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Análise do comportamento higrotérmico  
em regime variável de paredes sujeitas à  
acção da chuva incidente**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques, Professor  
Catedrático da FCT-UNL

Presidente: Prof. Doutor Miguel J. N. P. Amado

Arguente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro de 2015**



“Copyright” Guilherme Barreto Arez Coelho, da FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado o crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques pela oportunidade que me deu em elaborar a presente dissertação sob sua orientação. Gostaria ainda de agradecer ao Professor os esclarecimentos prestados, os documentos facultados e os ensinamentos partilhados ao longo do presente trabalho.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao Engenheiro Fernando Jorne pelos documentos facultados e os esclarecimentos prestados que ajudaram a conceber a presente dissertação.

Em terceiro lugar gostaria de agradecer a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia pelos ensinamentos partilhados, especialmente aos docentes do mestrado de Construção, Professor Fernando Henriques, Professora Paulina Rodrigues e Professor Daniel Aelenei.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio e pelo afecto que senti ao longo de toda a minha vida. Em especial agradeço ao meu tio Paulo Barreto pela partilha do seu saber na área de construção civil, à minha tia Helena pela sua ajuda preciosa em alguns trabalhos do meu percurso académico, ao meu irmão pela amizade, companheirismo e cumplicidade, ao meu pai por me ter demonstrado que, apesar dos inúmeros obstáculos que a vida nos apresenta, nunca se deve desistir nem parar de aprender e por toda a sua ajuda ao longo do curso, e à minha mãe o incansável apoio prestado ao longo de todo o meu percurso escolar.

Agradeço ainda aos meus amigos Ana Cláudia Melrinho, Ana Rita Ferreira, Carla Veiga, Filipe Franco, Francisco Peres, Gonçalo Antunes, João Arrojado, João Diogo Casquinho, Licínio Cruz, Miguel Barreto, Miguel Teixeira, Nuno Delgado, Raúl Alves, Raquel Fidalgo, Tiago Filipe Durão e a todos os outros pela sua ajuda ao longo da minha vida pessoal e académica. Um obrigado especial ao Rúben Miguel Correia pela camaradagem, acompanhamento e amizade que me ajudou a percorrer a longa caminhada inerente a um curso superior e à Inês Matias Martins pela paciência, dedicação, motivação e apoio prestado ao longo do meu curso, especialmente nesta fase final.

Dedico o presente trabalho à minha família, aos meus amigos, e a duas pessoas por quem tinha grande estima e continuo a recordar, João Nunes Barreto e Maria Delta dos Santos Adães.



## RESUMO

A crise económica e social que assola Portugal desde 2008 e o aumento da exigência do nível de qualidade de vida dos utilizadores dos imóveis deram origem a um aumento de investimento na área de reabilitação de edifícios. A informação recolhida a partir dos Censos de 2011 mostra que existem cerca de dois milhões de imóveis, correspondentes a 34% do parque habitacional nacional, que necessitam de recuperação. Este facto ilustra bem a importância da aposta na reabilitação de edifícios no mercado português.

A presente dissertação procura dar resposta a algumas das questões levantadas pela reabilitação de edifícios, nomeadamente em edifícios com paredes de tijolo maciço, através da análise higrotérmica de várias soluções construtivas que têm como camada de suporte o tijolo maciço, recorrendo ao programa WUFI® 4.2 - PRO.

O WUFI® 4.2 - PRO foi um programa construído pelo Fraunhofer Institute for Building Physics que permite simular o transporte simultâneo de calor e de humidade unidimensional em elementos construtivos com várias camadas.

Em primeiro lugar estudou-se o elemento construtivo com face à vista de modo a averiguar a influência da camada de tijolo maciço, seguindo-se uma análise à influência da espessura desta camada. Em segundo lugar analisou-se a influência do reboco exterior, interior e em ambas as faces na camada de tijolo maciço, tendo este estudo incluído argamassa de cal, de cal e cimento, e de cimento. Em terceiro lugar são analisadas as alterações que uma reabilitação térmica pelo interior ou pelo exterior impõem numa parede de tijolo maciço. Por último quantificou-se a diferença entre o coeficiente de transmissão térmica calculado em regime permanente e em regime variável, tendo esta análise sido efectuada para todos os elementos construtivos simulados na presente dissertação.

O estudo desenvolvido permitiu corroborar o facto de que a chuva incidente é a principal responsável pelo transporte de humidade no interior do elemento construtivo, e que a quantidade de chuva incidente absorvida pela superfície exterior do elemento influencia tanto o fluxo de difusão como o fluxo capilar.

As análises efectuadas permitiram clarificar a importância da camada de reboco. O reboco exterior diminui a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço, enquanto o reboco interior implica um aumento. A aplicação de reboco em ambas as faces implica uma quantidade de humidade na camada de tijolo superior à aplicação apenas de reboco exterior. Dos rebocos analisados o único que não implica um aumento da quantidade de humidade é o reboco de cimento.

Conclui-se que na aplicação de isolamento pelo exterior o reboco aplicado nas faces da camada de suporte não influencia de forma significativa o comportamento do elemento construtivo. No entanto, o mesmo não pode ser afirmado para a aplicação de isolamento pelo interior, já que o reboco exterior é principal responsável pela quantidade de humidade no elemento construtivo.

**Palavras-chave:** Chuva incidente; WUFI®; Regime Variável; Parede tijolo maciço; Reboco; Isolamento térmico pelo interior, Isolamento térmico pelo exterior.





## ABSTRACT

The economic and social crisis Portugal has faced since 2008 and the existence of more demanding consumers in the building industry gave origin to an increasing investment in the area of building rehabilitation. The data concerning the 2011 Census show that there are more than two million houses, which correspond to 34% of the national housing stock, that are in need of rehabilitation.

The present work tries to answer some of the issues raised by building rehabilitation, namely buildings with solid brick masonry. This will be done through the hygrothermal analysis of several building solutions, whose support layer is solid brick, using the WUFI® 4.2 - PRO Program.

WUFI® 4.2 - PRO was a program built by the Fraunhofer Institute for Building Physics that enables the simulation of simultaneous one-dimensional heat and moisture transport in building elements with several layers.

The work began by studying the unrendered building element in order to evaluate the influence of the solid brick layer, followed by the analysis of the influence of the layer thickness. The work then proceeded with the analysis of the influence of the render and plaster layers, and both layers in the solid brick layer using lime plaster, lime cement plaster and cement plaster, followed by the analysis of the influence of exterior and interior thermal insulation in solid brick masonry. The last part of the work consisted in the quantification of the difference between the thermal transmittance  $f$  calculated in steady-state conditions and in transient conditions. This analysis was carried out using all the building elements studied in the present dissertation.

The present work has confirmed the relevant contribution of the wind driven rain as the main responsible effect for the moisture transport inside the building element, and that the quantity of driven rain absorbed by the external surface of the element influences the capillary flux as well as the diffusion flux.

The analysis that was carried out showed the importance of the render and plaster layers. The render layer decreases the quantity of moisture in the solid brick layer, whereas the plaster layer increases it. Using render and plaster layers implies an amount of moisture that is higher than just using a render layer. The only render that does not increase the amount of moisture is the cement plaster.

It can be concluded that in the application of insulation on the outside the plaster applied in the supporting layers does not influence the behavior of the building element significantly. However, this is not the case when the application of the insulation is done on the inside, because the render is the main responsible for the amount of moisture in the building element.

**Keywords:** Wind driven rain; WUFI®; Transient Method; Solid brick masonry; Render and plaster; Exterior thermal insulation; Interior thermal insulation.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2. Objectivos.....	1
1.3. Plano de trabalho .....	3
<b>2. FUNDAMENTOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. Transporte de calor.....	5
2.1.1. Mecanismos de transporte de calor .....	6
2.1.1.1. Condução .....	6
2.1.1.2. Convecção .....	6
2.1.1.3. Radiação.....	7
2.1.2. Trocas de calor entre um meio ambiente e o respectivo paramento.....	8
2.1.3. Arrefecimento nocturno .....	9
2.1.4. Temperatura superficial exterior e interior.....	10
2.2. Transporte de humidade .....	11
2.2.1. Transporte de água líquida .....	11
2.2.1.1. Difusão de superfície.....	11
2.2.1.2. Condução capilar.....	11
2.2.2. Transporte de vapor de água .....	13
2.2.2.1. Difusão de vapor de água .....	13
2.2.2.2. Humidade relativa e pressão parcial.....	15
2.2.3. Trocas de vapor de água entre o meio ambiente e respectivo paramento .....	15
2.3. Adsorção e Absorção.....	16
2.3.1. Domínio higroscópico .....	17
2.3.2. Domínio capilar.....	18
2.3.3. Domínio super-saturação.....	18
2.4. Capilaridade .....	19
2.5. Chuva incidente.....	20
2.5.1. Métodos de caracterização da chuva incidente .....	20
2.5.1.1. Métodos experimentais .....	21
2.5.1.2. Métodos semi-empíricos .....	21
2.5.1.3. Método numérico .....	22
<b>3. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA WUFI®.....</b>	<b>23</b>
3.1. Metodologia de cálculo .....	23
3.1.1. Transporte de calor.....	23

3.1.2. Transporte de humidade .....	25
3.1.3. Transporte simultâneo de calor e de humidade .....	25
3.2. Inputs .....	26
3.2.1. Propriedades dos materiais .....	26
3.2.2. Dados climáticos .....	26
3.2.3. Coeficientes de transporte de superfície .....	27
3.2.4. Condições iniciais .....	27
3.3. Outputs .....	27
3.3.1. Status of Last Calculation .....	27
3.3.1.1. Teor de água .....	28
3.3.1.2. Fluxos de calor e humidade para o período de cálculo .....	28
3.3.1.3. Estado da simulação .....	28
3.3.1.3.1. Número de falhas de convergência .....	28
3.3.1.3.2. Número de falhas de absorção de água da chuva .....	29
3.3.1.4. Verificação da qualidade da malha numérica adoptada .....	29
3.3.1.4.1. Fluxo capilar e fluxo de difusão de vapor de água .....	29
3.3.1.4.2. Balanços de quantidade de água .....	30
3.3.2. Quick Graphs .....	30
3.3.3. Result Graphs .....	31
3.3.4. ASCII Export .....	32
3.3.5. Run Calculation with Film .....	33
3.4. Limitações do programa .....	33
3.5. Regras gerais para uma boa solução construtiva .....	34
<b>4. DADOS REQUERIDOS PELO PROGRAMA WUFI® .....</b>	<b>35</b>
4.1. Propriedades dos materiais necessários para efectuar os cálculos .....	35
4.1.1. Propriedades básicas dos materiais .....	35
4.1.1.1. Massa volúmica .....	35
4.1.1.2. Porosidade .....	36
4.1.1.3. Calor específico .....	36
4.1.1.4. Condutibilidade térmica .....	37
4.1.1.5. Factor de resistência à difusão de vapor .....	37
4.1.2. Propriedades complementares .....	37
4.1.2.1. Curva de armazenamento de humidade .....	37
4.1.2.1.1. Aproximação da curva de armazenamento de humidade .....	38
4.1.2.1.2. Curva de armazenamento de humidade padrão .....	39
4.1.2.2. Coeficientes de transporte de água líquida .....	39
4.1.2.3. Dependência da condutibilidade térmica em relação ao teor de água .....	40

4.1.2.4. Dependência do factor de resistência à difusão de vapor em relação ao teor de água	41
4.2. Elemento construtivo.....	41
4.2.1. Composição do elemento construtivo e posição dos pontos de monitorização.....	41
4.2.1.1. Elemento construtivo .....	42
4.2.1.2. Pontos de monitorização .....	42
4.2.1.3. Malha numérica.....	43
4.2.1.4. Fontes de calor, humidade e ventilação .....	43
4.2.2. Orientação e Inclinação do elemento construtivo, e Altura do edifício .....	43
4.2.2.1. Orientação do elemento construtivo.....	43
4.2.2.2. Inclinação do elemento construtivo.....	43
4.2.2.3. Altura do edifício .....	44
4.2.3. Coeficientes de transferência de superfície .....	45
4.2.3.1. Resistência térmica superficial.....	45
4.2.3.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente .....	46
4.2.3.3. Factor de absorção de radiação por onda-curta .....	47
4.2.3.4. Emissividade de radiação por onda-longa.....	47
4.2.3.5. Factor de absorção de chuva incidente.....	48
4.2.4. Condições iniciais .....	49
4.2.4.1. Constant Across Component.....	49
4.2.4.2. In each layer .....	49
4.2.4.3. Read from file .....	50
4.3. Controlo.....	50
4.3.1. Período de cálculo e perfis .....	50
4.3.2. Alterações numéricas .....	51
4.4. Condições climáticas.....	51
4.4.1. Meio ambiente exterior .....	52
4.4.2. Meio ambiente interior.....	52
4.4.2.1. Curvas sinusoidais.....	52
4.4.2.2. EN ISO 13788:2001 .....	53
4.4.2.3. EN 15026:2007 .....	53
<b>5. CLIMAS FRONTEIRA E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS .....</b>	<b>55</b>
5.1. Clima exterior e interior .....	55
5.1.1. Temperatura e humidade relativa do meio ambiente .....	56
5.1.2. Chuva incidente.....	58
5.1.3. Radiação Solar .....	59
5.1.4. Condutância térmica superficial.....	59
5.1.5. Coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão.....	60

5.2. Opções adoptadas nas soluções construtivas adoptadas.....	61
5.2.1. Inputs adoptados.....	61
5.2.2. Soluções construtivas com isolamento térmico.....	62
5.2.2.1. Espessura da camada de isolante térmico .....	62
5.2.2.1.1. Isolamento pelo interior .....	63
5.2.2.1.2. Isolamento pelo exterior.....	64
5.3. Propriedades dos materiais que compõem os elementos construtivos simulados .....	64
<b>6. SIMULAÇÕES EM PAREDES SIMPLES DE ALVENARIA DE TIJOLO MACIÇO .....</b>	<b>67</b>
6.1. Estudo sobre a influência da camada de tijolo maciço e a importância da chuva incidente .....	67
6.1.1. Análise ao teor de água .....	68
6.1.1.1. Estudo da parede de alvenaria tijolo maciço a uma vez.....	68
6.1.1.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo.....	70
6.1.2. Análise ao fluxo de calor.....	71
6.1.2.1. Estudo de parede simples de alvenaria de tijolo maciço a uma vez.....	71
6.1.2.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo.....	73
6.1.3. Análise ao fluxo de humidade .....	75
6.1.3.1. Estudo de parede simples de alvenaria de tijolo maciço a uma vez.....	75
6.1.3.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo.....	78
6.1.4. Importância dos fenómenos higratérmicos ao longo da secção transversal.....	82
6.1.4.1. Calor latente de fusão .....	82
6.1.4.2. Calor latente de evaporação .....	82
6.1.4.3. Importância da condução capilar e chuva incidente.....	83
6.2. Estudo sobre a influência da camada de reboco e a importância da chuva incidente.....	83
6.2.1. Análise ao teor de água .....	84
6.2.1.1. Alteração da constituição do elemento construtivo com reboco de cal.....	84
6.2.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco.....	86
6.2.1.2.1. Reboco aplicado pelo exterior.....	86
6.2.1.2.2. Reboco aplicado pelo interior .....	87
6.2.1.2.3. Reboco aplicado em ambas as faces .....	88
6.2.1.2.4. Importância da chuva incidente, e o teor de água na camada de reboco exterior e interior .....	88
6.2.2. Análise à temperatura.....	89
6.2.2.1. Alteração da constituição do elemento construtivo com reboco de cal.....	89
6.2.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco.....	90
6.2.2.2.1. Reboco aplicado pelo exterior.....	90
6.2.2.2.2. Reboco aplicado pelo interior .....	92
6.2.2.2.3. Reboco aplicado em ambas as faces .....	93

6.3. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo interior .....	94
6.3.1. Análise ao teor de água .....	95
6.3.1.1. Elemento construtivo com reboco de cal .....	95
6.3.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco .....	97
6.3.2. Análise à temperatura interior .....	100
6.3.2.1. Estudo para reboco de cal .....	100
6.3.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco .....	102
6.4. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo exterior .....	103
6.4.1. Análise ao teor de água .....	104
6.4.1.1. Elemento construtivo com reboco de cal .....	104
6.4.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco .....	106
6.4.2. Análise à temperatura interior .....	108
6.4.2.1. Estudo sobre reboco de cal.....	108
6.4.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco .....	109
6.5. Estudo sobre variação do coeficiente de transmissão térmica.....	110
<b>7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>113</b>
7.1. Conclusões .....	113
7.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros .....	115
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>121</b>
Anexo A – Dados a introduzir no programa WUFI® .....	123
Anexo B – Clima em Portugal .....	127
Anexo C – Soluções construtivas simuladas .....	129
Anexo D – Inputs das simulações efectuadas.....	131
Anexo E – Simulação em Parede simples de Alvenaria de tijolo maciço .....	137
Anexo E.1. Alteração da espessura da camada de tijolo maciço .....	139
Anexo E.2. Estudo sobre a influência da camada de reboco e a importância WDR.....	145
Anexo E.2.1 Reboco de cal .....	145
Anexo E.2.2 Reboco de cal e cimento .....	149
Anexo E.2.3 Reboco de cimento.....	150
Anexo E.3. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo interior .....	153
Anexo E.4. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo exterior .....	165
Anexo E.5. Estudo sobre a variação do coeficiente de transmissão térmica.....	171
Anexo F – Demonstrações matemáticas.....	175
Anexo F.1. Demonstração da relação entre o teor de água de saturação e o teor de água máximo.....	177

Anexo F.2. Demonstração do cálculo da espessura da camada de isolamento térmico .....	178
Anexo F.3. Demonstração do cálculo da altitude mínima na Grande Lisboa para I2 .....	179



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Mecanismos de transporte de calor e de humidade, e respectivos potenciais de transporte contabilizados na versão 4.2 IBP – PRO do WUFI® .....	5
Quadro 3.1 – Listagem dos parâmetros que variam ao longo do período de cálculo disponíveis nos <i>Result Graphs</i> .....	31
Quadro 4.1 – Valores dos coeficientes de chuva incidente em função da altura do edifício para paredes verticais .....	44
Quadro 5.1 – Propriedades básicas dos isolamentos térmicos utilizados nas simulações efectuadas na presente dissertação .....	65
Quadro 5.2 – Propriedades básicas e complementares dos materiais utilizados nas simulações efectuadas na presente dissertação .....	65
Quadro 6.1 – Especificações importantes para as simulações efectuadas com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço .....	68
Quadro 6.2 – Diferença mínima e máxima atingida ao longo do quarto ano do período de cálculo para os três casos de estudo .....	71
Quadro 6.3 – Fluxo de calor para as simulações com e sem chuva incidente, e respectiva diferença para clima exterior e interior em relação ao quarto ano do período de cálculo .....	75
Quadro 6.4 – Fluxo capilar para os três casos de estudo entre as quatro e as oito da manhã do dia 11 de Novembro de 2018 .....	80
Quadro 6.5 – Fluxo de humidade para os três casos de estudo, e a diferença do fluxo de humidade entre as simulações com e sem chuva incidente em relação ao quarto ano do período de cálculo .....	81
Quadro 6.6 – Propriedades da camada em contacto directo com o clima exterior e com o clima interior em função dos casos de estudos analisados .....	86
Quadro 6.7 – Condições do meio ambiente exterior e interior ao meio dia do dia 2 de Janeiro de 2015 .....	93
Quadro 6.8 – Espessura das camadas que compõem o elemento construtivo de cada caso de estudo da reabilitação térmica pelo interior e respectiva espessura total .....	95
Quadro 6.9 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo, e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para o caso de estudo padrão e os cinco casos com reboco de cal .....	95
Quadro 6.10 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente e aumento em relação ao caso de estudo padrão dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	97
Quadro 6.11 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para os cinco casos de estudo com reboco de cal, de cal e cimento e de cimento. ....	98
Quadro 6.12 – Espessura das camadas que compõem o elemento construtivo de cada caso de estudo da reabilitação térmica pelo exterior e a respectiva espessura total .....	104
Quadro 6.13 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para o caso de estudo padrão e os três casos com reboco de cal em ambas as faces .....	104
Quadro 6.14 – Espessura do elemento construtivo, espessura da camada de ar de difusão equivalente total e o respectivo aumento em relação ao caso de estudo padrão .....	105
Quadro 6.15 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico .....	106

Quadro 6.16 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente do elemento construtivo, e o seu aumento em relação ao caso de estudo padrão.....	107
--	-----

## ANEXOS

Quadro A.1 – Simbologia dos processos de transporte de humidade utilizada na verificação da qualidade da malha numérica .....	123
Quadro A.2 – Lista de camadas que o programa tem na biblioteca para o clima exterior e interior, e respectiva espessura da camada de ar de difusão equivalente .....	123
Quadro A.3 – Valor médio anual da temperatura, valor da amplitude e o dia a que corresponde o valor máximo da temperatura, consoante o clima .....	123
Quadro A.4 – Valor médio anual da humidade relativa, valor da amplitude e o dia a que corresponde o valor máximo da humidade relativa, consoante o clima .....	123
Quadro A.5 – Tipo de edifícios que corresponde a cada classe de humidade na norma EN ISO 13788:2001 .....	124
Quadro A.6 – Tipo de edifícios que corresponde a cada nível de carga de humidade na norma EN 15026:2007 .....	124
Quadro A.7 – Simbologia utilizada num ficheiro climático do tipo WAC .....	125
Quadro C.1 – Valores de altitude e de graus-dias referência, mínimos e máximos .....	129
Quadro C.2 – Propriedades dos materiais que compõem as soluções construtivas simuladas.....	129
Quadro C.3 – Resistência térmica em função da espessura da camada de tijolo maciço.....	129
Quadro C.4 – Resistência térmica total e coeficiente de transmissão térmica em função do tipo de reboco aplicado no elemento construtivo .....	129
Quadro C.5 – Espessura mínima e espessura recomendada do isolamento térmico EPS .....	130
Quadro C.6 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica para um isolamento térmico pelo interior .....	130
Quadro C.7 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica para um isolamento térmico pelo exterior .....	130
Quadro C.8 – Propriedades básicas do poliestireno expandido superficial.....	130
Quadro D.1 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada de tijolo maciço a uma vez .....	131
Quadro D.2 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco exterior de cal.....	132
Quadro D.3 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco interior de cal .....	133
Quadro D.4 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco de cal em ambas as faces .....	134
Quadro D.5 – Inputs adoptados no programa WUFI® para as simulações de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces.....	135
Quadro D.6 – Inputs adoptados no programa WUFI® para as simulações de reabilitação térmica pelo exterior com reboco de cal em ambas as faces.....	136
Quadro E.1 – Fluxo de humidade, de difusão e capilar anuais para o clima exterior e o interior relativamente à simulação com chuva incidente do primeiro caso de estudo .....	139

Quadro E.2 – Fluxo de humidade, de difusão e capilar anuais para o clima exterior e o interior relativamente à simulação sem chuva incidente do primeiro caso de estudo.....	139
Quadro E.3 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cal .....	145
Quadro E.4 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cal e cimento.....	149
Quadro E.5 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cimento .....	150
Quadro E.6 – Espessura e espessura da camada de ar de difusão equivalente e respectivo aumento em relação ao caso de estudo padrão para os casos de estudo com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento.....	160
Quadro E.7 – Cálculo da resistência térmica do elemento construtivo do segundo, terceiro e quarto casos de estudo.....	162
Quadro E.8 – Cálculo da resistência térmica do elemento construtivo do quinto caso de estudo.....	162
Quadro E.9 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com 22, 34 e 25 centímetros de espessura .....	171
Quadro E.10 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com reboco exterior .....	171
Quadro E.11 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com reboco interior .....	171
Quadro E.12 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com reboco exterior e interior.....	171
Quadro E.13 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo interior e reboco de cal .....	172
Quadro E.14 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo interior e reboco de cal e cimento .....	172
Quadro E.15 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo interior e reboco de cimento.....	172
Quadro E.16 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo exterior e reboco de cal .....	172
Quadro E.17 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo exterior e reboco de cal e cimento.....	173
Quadro E.18 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do $U_{MÉDIO}$ em relação ao $U_{WUFI}$ para os casos com IT pelo exterior e reboco de cimento .....	173



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de curva de armazenamento de humidade de um material higroscópico.....	17
Figura 2.2 – Pressão capilar num poro com secção transversal circular .....	20
Figura 5.1 – Distribuição direccional da radiação solar (A) e da chuva incidente (B).....	55
Figura 5.2 – Variação da temperatura e da humidade relativa do meio ambiente exterior ao longo do ano de referência .....	56
Figura 5.3 – Variação da temperatura do meio ambiente interior ao longo do ano de referência.....	56
Figura 5.4 – Variação da humidade relativa do meio ambiente interior ao longo do ano de referência.....	57
Figura 5.5 – Variação da temperatura do meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência.....	57
Figura 5.6 – Variação da humidade relativa do meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência .....	58
Figura 5.7 – Quantidade de chuva incidente anual em função da orientação.....	58
Figura 5.8 – Variação da chuva incidente para Sudoeste ao longo do ano de referência.....	58
Figura 5.9 – Quantidade de radiação solar anual em função da orientação .....	59
Figura 5.10 – Variação da radiação solar para Sudoeste ao longo do ano de referência.....	59
Figura 5.11 – Variação da condutância térmica superficial exterior e interior ao longo do ano de referência.....	60
Figura 5.12 – Variação do coeficiente de transferência de vapor para o meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência.....	60
Figura 6.1 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço das simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo.....	68
Figura 6.2 – Variação do teor de água para a simulação com chuva incidente e o perfil da chuva incidente .....	69
Figura 6.3 – Diferença, em percentagem, do teor de água das simulações com e sem chuva incidente .....	69
Figura 6.4 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço dos três casos de estudo.....	70
Figura 6.5 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos três casos de estudo .....	71
Figura 6.6 – Variação da temperatura do paramento exterior para as simulações sem e com chuva incidente, e da temperatura do meio ambiente exterior.....	72
Figura 6.7 – Variação do fluxo de calor entre meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações sem e com chuva incidente .....	72
Figura 6.8 – Variação da temperatura do paramento interior para as simulações com e sem chuva incidente, e da temperatura do meio ambiente interior .....	73
Figura 6.9 – Variação do fluxo de calor entre meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente .....	73
Figura 6.10 – Variação do fluxo de calor entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo .....	74
Figura 6.11 – Variação do fluxo de calor entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo dos três casos de estudo .....	74

Figura 6.12 – Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo.....	76
Figura 6.13 – Variação do fluxo de difusão entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo .....	77
Figura 6.14 – Variação do fluxo capilar entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo .....	77
Figura 6.15 – Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo.....	78
Figura 6.16 – Variação do fluxo de difusão entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo .....	79
Figura 6.17 – Variação do fluxo capilar entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo .....	79
Figura 6.18 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às seis da manhã.....	80
Figura 6.19 - Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo dos três casos de estudo .....	81
Figura 6.20 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal .....	84
Figura 6.21 – Diferença, em percentagem, entre o teor de água das simulações com e sem chuva incidente para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal .....	85
Figura 6.22 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do segundo caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento .....	86
Figura 6.23 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do terceiro caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento .....	87
Figura 6.24 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do quarto caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento .....	88
Figura 6.25 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal.....	89
Figura 6.26 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e o segundo caso com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal .....	90
Figura 6.27 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o segundo caso de estudo de estudo com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento .....	91
Figura 6.28 – Diferença de temperatura entre a simulação sem e com evaporação para o segundo caso de estudo com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento.....	92
Figura 6.29 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e para o terceiro caso com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento.....	93
Figura 6.30 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos de estudo.....	94
Figura 6.31 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e para o quarto caso com rebocos de cimento, de cal e cimento, e de cal.....	94

Figura 6.32 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	96
Figura 6.33 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	97
Figura 6.34 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cimento em ambas as faces .....	98
Figura 6.35 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de poliestireno moldado em função do tipo de reboco .....	99
Figura 6.36 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para os cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	101
Figura 6.37 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para os casos de estudo de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces .....	101
Figura 6.38 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento e de cal em ambas as faces .....	102
Figura 6.39 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces .....	102
Figura 6.40 – Variação da diferença de temperatura a meio da camada de tijolo entre as simulações sem e com evaporação para o segundo caso (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento e de cal em ambas as faces .....	103
Figura 6.41 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do primeiro, segundo e terceiro casos de estudo com reboco de cal ambas as faces .....	105
Figura 6.42 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do primeiro, segundo e terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	106
Figura 6.43 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces .....	107
Figura 6.44 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces .....	108
Figura 6.45 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	109
Figura 6.46 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces .....	110
Figura 6.47 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o terceiro caso de estudo (XPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces .....	110

## ANEXOS

Fig. A.1 – Variação das classes de humidade referentes ao clima interior em função da temperatura exterior .....	124
Fig. A.2 – Valor médio diário da temperatura interior e da humidade relativa, consoante o tipo de edifício, em função do valor médio diário da temperatura exterior .....	125
Fig. B.1 – Quantidade de chuva incidente por cada mês do ano de referência .....	127
Fig. B.2 – Quantidade de radiação solar por cada mês do ano de referência para Sudoeste .....	127
Fig. E.1 – Variação do fluxo capilar para o primeiro caso de estudo e da chuva incidente .....	139

Fig. E.2 – Variação da pressão parcial de vapor de água do paramento exterior para o terceiro, o segundo e o primeiro casos de estudo, e para o meio ambiente exterior.....	140
Fig. E.3 – Variação da pressão parcial de vapor de água do paramento interior para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo, e para o meio ambiente interior.....	140
Fig. E.4 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às cinco da manhã .....	140
Fig. E.5 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às sete da manhã.....	141
Fig. E.6 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de fusão .....	141
Fig. E.7 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de fusão .....	141
Fig. E.8 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação caso de estudo padrão e à simulação sem calor latente de evaporação.....	142
Fig. E.9 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de evaporação.....	142
Fig. E.10 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão, à simulação sem condução capilar e à simulação sem chuva incidente.....	142
Fig. E.11 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação sem condução capilar e à simulação sem chuva incidente .....	143
Fig. E.12 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o primeiro e o segundo casos de estudo com reboco de cal.....	145
Fig. E.13 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o primeiro e o terceiro casos de estudo com reboco de cal.....	145
Fig. E.14 – Variação do teor de água para o primeiro (A), o segundo (B), o terceiro (C) e o quarto (D) casos de estudo com reboco de cal .....	146
Fig. E.15 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do terceiro caso de estudo com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento no dia 1 de Junho de 2017.....	146
Fig. E.16 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o segundo e o quarto casos de estudo com reboco de cal.....	147
Fig. E.17 – Variação do teor de água para a camada de reboco exterior para o segundo e o quarto casos de estudo.....	147
Fig. E.18 – Variação do teor de água para a camada de reboco interior para o terceiro e o quarto casos de estudo.....	147
Fig. E.19 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal .....	148
Fig. E.20 – Diferença de temperatura entre as simulações sem e com evaporação para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com rebocos de cal.....	148
Fig. E.21 – Importância da chuva incidente em relação à camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal e cimento.....	149



Fig. E.22 – Variação do teor de água da camada de reboco de cal e cimento exterior para o segundo e o quarto casos de estudo.....	149
Fig. E.23 – Variação do teor de água da camada de reboco de cal e cimento interior para o terceiro e o quarto casos de estudo.....	150
Fig. E.24 – Importância da chuva incidente em relação à camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cimento .....	150
Fig. E.25 – Variação do teor de água da camada de reboco de cimento exterior para o segundo e o quarto casos de estudo.....	151
Fig. E.26 – Variação do teor de água da camada de reboco de cimento interior para o terceiro e o quarto casos de estudo.....	151
Fig. E.27 – Variação do teor de água ao longo do elemento construtivo para o segundo (A), o terceiro (B), o quarto (C) e o quinto (D) casos de estudo com reboco de cal.....	153
Fig. E.28 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior .....	153
Fig. E.29 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior.....	154
Fig. E.30 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior .....	154
Fig. E.31 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior .....	154
Fig. E.32 – Variação do teor de água ao longo do elemento construtivo para o segundo (A), o terceiro (B), o quarto (C) e o quinto (D) casos de estudo com reboco de cal e cimento .....	155
Fig. E.33 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces.....	155
Fig. E.34 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces .....	156
Fig. E.35 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	156
Fig. E.36 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	156
Fig. E.37 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	157
Fig. E.38 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	157
Fig. E.39 – Variação do teor de água ao longo do elemento construtivo para o segundo (A), o terceiro (B), o quarto (C) e o quinto (D) casos de estudo com reboco de cimento .....	158
Fig. E.40 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cimento em ambas as faces.....	158
Fig. E.41 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior.....	159

Fig. E.42 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	159
Fig. E.43 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior .....	159
Fig. E.44 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior.....	160
Fig. E.45 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de lâ mineral em função do tipo de reboco .....	160
Fig. E.46 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de aglomerado de cortiça expandido em função do tipo de reboco .....	161
Fig. E.47 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de poliestireno extrudido em função do tipo de reboco .....	161
Fig. E.48 – Variação da condutibilidade térmica da camada de tijolo maciço para os quatro casos de estudo de reabilitação térmica com reboco de cal em ambas as faces.....	162
Fig. E.49 – Variação da resistência térmica apenas para as camadas de tijolo maciço e de isolamento térmico dos quatro casos de estudo de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces.....	163
Fig. E.50 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o terceiro caso de estudo (MW) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces .....	163
Fig. E.51 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o quarto caso de estudo (ICB) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces .....	163
Fig. E.52 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o quinto caso de estudo (XPS) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces .....	164
Fig. E.53 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	165
Fig. E.54 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	165
Fig. E.55 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face.....	165
Fig. E.56 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face.....	166
Fig. E.57 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do segundo e do terceiro casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces.....	166
Fig. E.58 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face .....	166
Fig. E.59 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face .....	167
Fig. E.60 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do segundo e do terceiro casos de estudo com reboco de cimento em ambas as faces.....	167
Fig. E.61 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face.....	167

Fig. E.62 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face.....	168
Fig. E.63 – Variação da temperatura para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	168
Fig. E.64 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	169
Fig. E.65 – Importância do efeito de evaporação em termos de temperatura para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces .....	169



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviatura	Significado
APICER	Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica
CEP	Caso de estudo padrão
CP	Cement Plaster (Reboco de cimento)
EPS	Poliestireno expandido moldado
ETICS	External Thermal Insulation Composite Systems
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
Fraunhofer IBP	Fraunhofer Institute for Building Physics
HAM	Combined Heat, Air and Moisture transfer
ICB	Aglomerado de cortiça expandido
ITE	Informação técnica edifícios
IT	Isolamento térmico
LCP	Lime Cement Plaster (Reboco de cal e cimento)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Lime Plaster (Reboco de cal)
MW	Lã mineral
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
REH	Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Habitação
UNL	Universidade Nova de Lisboa
WTA	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (Associação Técnico-Científica para a Manutenção de Edifícios e Preservação de Monumentos)
WDR	Wind Driven Rain ou Driven Rain (chuva incidente)
WUFI	Wärme und Feuchte Instationär (Heat and Moisture transiency)
XPS	Poliestireno expandido extrudido

Simbologia [alfabeto romano]		
Símbolo	Denominação	Unidade
A	Coeficiente de absorção de água	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0.5</sup> ]
a	Declive	[°C/km]
a <sub>s</sub>	Factor de absorção de radiação por onda-curta	[-]
a <sub>r</sub>	Factor de absorção de chuva incidente	[-]
B	Coeficiente de penetração da água	[m/s <sup>0.5</sup> ]
b	Suplemento de condutibilidade térmica	[%/M.-%]
c <sub>e</sub>	Capacidade específica de gelo	[J/kg.K]
c <sub>s</sub>	Capacidade específica do material	[J/kg.K]
c <sub>w</sub>	Capacidade específica da água líquida	[J/kg.K]
DRL	Driving rain load	[l/m <sup>2</sup> .h]
D <sub>w</sub> (w)	Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>ws</sub>	Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para sucção	[m <sup>2</sup> /s]

$D_{ww}$	Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para redistribuição	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{\varphi}$	Coeficiente de condução de humidade na fase líquida	[kg/m.s]
$d$	Factor de aproximação	[-]
GD	Número de graus-dias	[°C]
$g_v$	Fluxo de difusão de vapor de água	[kg/m <sup>2</sup> .s]
$g_w$	Fluxo de transporte de humidade na fase líquida	[kg/m <sup>2</sup> .s]
$H$	Entalpia total	[J/m <sup>3</sup> ]
HR	Humidade relativa	[%]
$H_s$	Entalpia do material seco	[J/m <sup>3</sup> ]
$H_w$	Entalpia da humidade no material	[J/m <sup>3</sup> ]
$h_e$	Entalpia específica de fusão	[J/kg]
$h_v$	Calor latente de mudança de fase	[J/kg]
$h$	Condutância térmica	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_c$	Condutância térmica por convecção	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_r$	Condutância térmica por radiação	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{ext}$	Condutância térmica superficial exterior	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{int}$	Condutância térmica superficial interior	[W/m <sup>2</sup> .K]
$I$	Intensidade da radiação solar vertical à superfície exterior do elemento construtivo	[W/m <sup>2</sup> ]
ML	Carga de humidade	[g/m <sup>3</sup> ]
MP	Produção de humidade	[g/m <sup>3</sup> .h]
$m$	Massa da amostra	[kg]
$m_w$	Quantidade de água absorvida	[kg/m <sup>2</sup> ]
$N_a$	Humidade absoluta exterior	[kg/m <sup>3</sup> ]
$N_i$	Humidade absoluta interior	[kg/m <sup>3</sup> ]
$n$	Taxa de renovações	[h <sup>-1</sup> ]
$P_{\text{água}}$	Pressão da água	[Pa]
$P_{\text{ar}}$	Pressão do ar	[Pa]
$P_c$	Pressão capilar	[Pa]
$P_L$	Pressão atmosférica do meio ambiente	[Pa]
$P_v$	Pressão parcial de vapor de água	[Pa]
$P_{v,sat}$	Pressão de saturação de vapor de água	[Pa]
$Q$	Quantidade de calor	[W]
$Q_{max}$	Quantidade de energia emitida de um corpo negro	[W/m <sup>2</sup> ]
$q$	Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$R_D$	Constante de gases para ar seco	[J/kg.K]
$R_s$	Carga de precipitação vertical à superfície do elemento construtivo	[kg/m <sup>2</sup> .s]
$R_1, R_2$	Raios de curvatura	[m]

R1	Coeficiente de chuva incidente	[-]
R2	Coeficiente de chuva incidente	[s/m]
RN	Quantidade de chuva normal	[l/m <sup>2</sup> .h]
R	Resistência térmica	[m <sup>2</sup> .K/W]
R <sub>T</sub>	Resistência térmica total	[m <sup>2</sup> .K/W]
R <sub>se</sub>	Resistência térmica superficial exterior	[m <sup>2</sup> .K/W]
R <sub>si</sub>	Resistência térmica superficial interior	[m <sup>2</sup> .K/W]
r	Raio do poro	[m]
S <sub>h</sub>	Fonte/dissipador de calor	[W/m <sup>3</sup> ]
S <sub>w</sub>	Fonte/dissipador de humidade	[kg/m <sup>3</sup> .s]
S	Área	[m <sup>2</sup> ]
s	Espessura da camada de material	[m]
s <sub>d</sub>	Espessura da camada de ar de difusão equivalente	[m]
T	Temperatura absoluta	[K]
T <sub>a</sub>	Temperatura do meio ambiente	[K]
T <sub>e</sub>	Temperatura do meio ambiente exterior	[K]
T <sub>i</sub>	Temperatura do meio ambiente interior	[K]
T <sub>s</sub>	Temperatura absoluta da superfície do material	[K]
T <sub>env</sub>	Temperatura absoluta da envolvente	[K]
T <sub>se</sub>	Temperatura superficial exterior	[K]
T <sub>si</sub>	Temperatura superficial interior	[K]
t	Tempo	[s]
U	Coeficiente de transmissão térmica	[W/m <sup>2</sup> .K]
U <sub>ITE</sub>	Coeficiente de transmissão térmica ITE	[W/m <sup>2</sup> .K]
U <sub>MÉDIO</sub>	Coeficiente de transmissão térmica MÉDIO	[W/m <sup>2</sup> .K]
U <sub>WUFI</sub>	Coeficiente de transmissão térmica WUFI	[W/m <sup>2</sup> .K]
V <sub>poros</sub>	Volume ocupado pelos poros	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>Total</sub>	Volume da amostra	[m <sup>3</sup> ]
v <sub>wind</sub>	Velocidade do vento	[m/s]
w <sub>80</sub>	Teor de água referência	[kg/m <sup>3</sup> ]
w	Teor de água	[kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>crit</sub>	Teor de água crítico	[kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>e</sub>	Teor de água da humidade no estado sólido	[kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>max</sub>	Teor de água máximo	[kg/m <sup>3</sup> ]
w <sub>sat</sub>	Teor de água de saturação	[kg/m <sup>3</sup> ]
X	Profundidade de penetração da água	[m]
x	Coordenada espacial	[m]
z	Altitude	[km]

Simbologia [alfabeto grego]		
Símbolo	Denominação	Unidade
$\beta_p$	Coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão	[kg/m <sup>2</sup> .s.Pa]
$\delta$	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar	[kg/m <sup>2</sup> .s.Pa]
$\delta_m$	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material	[kg/m <sup>2</sup> .s.Pa]
$\delta N$	Suplemento de humidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Emissividade	[-]
$\theta$	Temperatura	[°C]
$\theta_a$	Temperatura média exterior mensal	[°C]
$\theta$	Ângulo de contacto	[°]
$\lambda$	Condutibilidade térmica do material	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\lambda_0$	Condutibilidade térmica do material seco	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\mu$	Factor de resistência à difusão de vapor	[-]
$\mu^*$	Factor de resistência à difusão de vapor fictício	[-]
$\rho_{bulk}$	Massa volúmica do material seco	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{true}$	Massa volúmica aparente	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Massa volúmica da água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	<i>Constante de Stefan-Boltzman</i>	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$\sigma$	Tensão superficial	[N/m]
$\varphi$	Humidade relativa	[-]
$\varphi_a$	Humidade relativa média exterior mensal	[-]
$\psi$	Porosidade	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e enquadramento do tema

A crise económica e financeira de 2008 teve consequências nefastas na economia portuguesa com grande incidência na área da construção civil. A queda abrupta de investimento na área de construção nova levou à necessidade de redireccionar a actividade do engenheiro civil, surgindo a área de reabilitação de edifícios como alternativa a esta realidade de crise.

Contudo, não é só devido à crise económica que a reabilitação de edifícios ganha um novo ímpeto. Com efeito, uma maior exigência de níveis de qualidade, sobretudo a nível acústico e térmico, por parte dos utilizadores de imóveis contribuiu decisivamente para uma aposta na reabilitação de edifícios.

De acordo com a informação recolhida pelos Censos de 2011 existem cerca de dois milhões de imóveis que necessitam recuperação, o que representa 34% do parque habitacional nacional, representando a reabilitação de edifícios apenas 6,5% da actividade do sector da construção em Portugal [5].

Uma das principais causas de patologia em paredes em contacto com o exterior é a existência de humidade no seu interior. Existem múltiplas razões para que haja humidade no interior de um elemento construtivo, sendo a chuva incidente uma delas [20].

A presente dissertação consiste na análise higrotérmica e na análise da influência da chuva incidente em várias soluções construtivas que têm como camada de suporte o tijolo maciço, e é fruto de um total de 103 simulações efectuadas recorrendo ao programa de cálculo de transporte simultâneo de calor e de humidade WUFI®. A versão utilizada foi a 4.2 IBP – PRO, com licença para a Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia.

As soluções construtivas analisadas são referentes a imóveis até 10 metros de altura e com uso estritamente habitacional, com orientação Sudoeste.

A presente dissertação tem o propósito de contribuir para a aposta actual na área da reabilitação de edifícios ao analisar várias soluções construtivas com o tijolo maciço como camada de suporte de modo a caracterizar a influência da chuva incidente nas mesmas soluções construtivas e a influência dos vários constituintes das soluções construtivas analisadas tais como: a camada de tijolo maciço; a camada de reboco; a camada de isolamento térmico pelo interior; e a camada de isolamento térmico pelo exterior.

## 1.2. Objectivos

A presente dissertação consiste na análise higrotérmica de várias soluções construtivas recorrendo ao programa de cálculo WUFI®. A análise efectuada compreende dois níveis: o primeiro nível consiste numa análise higrotérmica das camadas que compõem os elementos construtivos (e.g. a camada de tijolo maciço); o segundo nível consiste numa análise da importância da chuva incidente nos elementos construtivos simulados para o clima de Lisboa.

O método de *Glaser* é um método analítico de detecção de condensações internas que se baseia no cálculo da temperatura e da pressão parcial de vapor de água a partir das condições dos climas fronteira. A temperatura é calculada recorrendo à *Lei de Fourier*, a pressão parcial de vapor de água é calculada recorrendo à *Lei de Fick*, e a pressão de saturação de vapor de água é calculada a partir da temperatura. A verificação de ocorrência de condensações internas é efectuada através da comparação entre a pressão parcial e a pressão de saturação de vapor de água ao longo do elemento construtivo, em que quando a pressão parcial é superior ocorre condensação.

De modo a que seja um método analítico possível resolver sem recorrer a ferramentas de cálculo avançado são aceites vários condicionalismos, que têm como consequência o afastamento da realidade, tais como: considerar que as trocas de calor e as trocas de vapor de água são efectuadas sob regime permanente; admitir que apenas ocorre condensação quando a humidade relativa é 100%; a não

contabilização de alguns fenómenos higrotérmicos (e.g. diminuição da temperatura interior devido à evaporação) e de algumas acções solicitantes (e.g. chuva incidente).

A utilização do programa de cálculo WUFI® tem como objectivo encurtar a distância em relação à realidade ao efectuar os cálculos sob regime variável, tendo em conta a dependência entre as trocas de calor e as trocas de humidade, e simultaneamente contabiliza alguns dos fenómenos higrotérmicos e acções solicitantes não consideradas pelo método de *Glaser*.

A presente dissertação tenta responder a algumas das questões levantadas pela reabilitação de edifícios, em termos térmicos, em que a soluções construtivas aplicadas tenham tijolo maciço como camada de suporte, e quantificar a importância da chuva incidente nas paredes simples de alvenaria de tijolo maciço de modo a melhor compreender a acção da chuva incidente no clima de Lisboa.

As análises são efectuadas em relação a soluções construtivas de tijolo maciço porque este representa uma tipologia de construção utilizada em Portugal entre o século XIX e o século XX. A outra razão que justifica esta opção é a forma como o programa WUFI® efectua o cálculo da resistência térmica não tendo em conta as perfurações existentes no tijolo. O cálculo é efectuado a partir da respectiva espessura e condutibilidade térmica. Por esta razão optou-se por tijolo maciço, já que se trata do tipo de tijolo que melhor se enquadra nesta metodologia de cálculo.

Foram delineados cinco objectivos para a presente dissertação: I) Identificar a influência da chuva incidente; II) Identificar a importância da camada tijolo maciço; III) Quantificar a importância da camada de reboco exterior e interior; IV) Identificar as alterações causadas pela aplicação de um sistema de isolamento térmico na solução construtiva; e V) Quantificar a diferença do coeficiente de transmissão térmica calculado em regime permanente e em regime variável.

O estudo sobre a influência da chuva incidente foi efectuado em relação a uma parede aparente de tijolo maciço a uma vez. Foram analisados os fluxos de humidade e de calor interiores e exteriores e o teor de água da camada de tijolo maciço. A metodologia adoptada foi a comparação entre duas simulações da mesma solução construtiva, em que numa se considera um factor de absorção da chuva incidente nulo e na outra se considera o valor recomendado (i.e. 0,7) [41].

No estudo sobre a importância da camada tijolo maciço foram analisados os fluxos de humidade e de calor referentes ao clima exterior e ao clima interior, e o teor de água da camada de tijolo maciço. A metodologia adoptada foi a comparação entre três soluções construtivas, em que se altera apenas a espessura da camada tijolo maciço (i.e. 22 cm, 34 cm e 45 cm).

No estudo sobre a quantificação da importância do reboco exterior e do reboco interior foram analisados o teor de água e a temperatura no centro da camada de tijolo maciço. Este estudo foi efectuado para reboco de cal, cal e cimento e cimento. A metodologia adoptada foi a comparação entre duas soluções construtivas, em que numa se considera a camada de reboco em estudo na constituição do elemento construtivo e na outra não se considera tal camada.

O estudo sobre as alterações que a aplicação de um sistema de isolamento térmico impõe na solução construtiva foi efectuado para o caso do sistema ser aplicado pelo interior e pelo exterior. O sistema de isolamento térmico pelo interior é constituído por uma camada de isolamento térmico – EPS, MW, ICB e XPS – de quatro centímetros e uma placa de gesso cartonado de 1,25 milímetros. O sistema de isolamento térmico pelo exterior é composto por um reboco sintético de dois milímetros e uma camada de isolamento térmico – EPS e XPS – de quatro centímetros. Estes estudos foram efectuados para reboco de cal, cal e cimento e cimento. Foram analisados o teor de água e a temperatura no centro da camada de tijolo maciço. A metodologia adoptada foi a comparação entre duas soluções construtivas, em que numa se considera o sistema de isolamento térmico e na outra não se considera.

O estudo sobre a quantificação da diferença do coeficiente de transmissão térmica calculado foi efectuado para todos os elementos construtivos simulados na presente dissertação. A metodologia adoptada foi a comparação entre o coeficiente de transmissão térmica calculado em regime permanente e o coeficiente de transmissão térmica calculado em regime variável recorrendo aos *outputs* do programa WUFI® em relação ao mesmo elemento construtivo.

### **1.3. Plano de trabalho**

A presente dissertação é composta por oito capítulos, incluindo o presente capítulo de enquadramento do tema e apresentação dos objectivos da presente dissertação. Em seguida são apresentados os restantes capítulos da dissertação:

O segundo capítulo consiste na exposição dos conceitos relacionados com a física das construções que devem ser dominados de modo a ser possível compreender os pressupostos em que o programa WUFI® se baseia e possibilitar a explicação dos resultados obtidos a partir das simulações efectuadas.

O terceiro capítulo consiste na descrição do funcionamento do programa, na apresentação das limitações do programa e na apresentação de alguns critérios que devem ser garantidos de modo a que o elemento construtivo tenha um comportamento higrotérmico adequado.

O quarto capítulo consiste na descrição das propriedades dos materiais, e na descrição das opções passíveis de serem adoptadas em relação: às condições do elemento construtivo; ao modo de controlo da simulação; e às formas de simular as condições climáticas referente ao clima exterior e interior.

O quinto capítulo consiste na apresentação dos dados higrotérmicos importantes em relação ao clima exterior e ao interior, nomeadamente: a temperatura e a humidade relativa; a chuva incidente consoante a orientação adoptada; a radiação solar consoante a orientação adoptada; a condutância térmica superficial; o coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão. Estes dados são comuns às simulações efectuadas na presente dissertação, sendo referentes ao clima de Lisboa.

O sexto capítulo consiste na explicação das opções adoptadas ao longo da presente dissertação, no cálculo da espessura da camada de isolamento para as reabilitações térmicas pelo interior e pelo exterior, e na apresentação das propriedades dos materiais simulados.

O sétimo capítulo consiste na apresentação dos resultados mais significativos e das respectivas explicações em relação às simulações efectuadas, nomeadamente: o aumento da espessura da camada de tijolo maciço; a alteração da posição da camada de reboco; as reabilitações térmicas pelo interior; e as reabilitações térmicas pelo exterior.

O oitavo capítulo consiste no resumo das conclusões alcançadas ao longo da presente dissertação e na apresentação de algumas sugestões para trabalhos de investigação futuros.



## 2. FUNDAMENTOS

Existem vários fenómenos responsáveis pelo transporte de calor e de humidade. Contudo, nem todos os mecanismos de transporte são considerados na versão 4.2 IBP – PRO do programa WUFI®. O Quadro 2.1 apresenta os mecanismos de transporte de calor e de humidade considerados nesta versão do programa WUFI®, e os respectivos potenciais de transporte.

Quadro 2.1 – Mecanismos de transporte de calor e de humidade, e respectivos potenciais de transporte contabilizados na versão 4.2 IBP – PRO do WUFI® [41]

Transporte		Mecanismo de transporte	Causa e potencial de transporte
Calor		Condução	Temperatura
		Radiação	Temperatura à quarta potência (K)
		Fluxos de entalpia devido a movimentos da humidade com mudança de fase	Difusão de vapor com mudança de fase e fluxo de humidade líquida transportada
		Arrefecimento nocturno	Temperatura à quarta potência (K)
Humidade	Vapor de água	Difusão de vapor de água	Pressão parcial de vapor de água (temperatura, pressão total)
		Difusão de solução	Pressão parcial de vapor de água
	Água líquida	Condução capilar	Pressão de sucção capilar
		Difusão de superfície	Humidade relativa

O transporte de calor e de vapor de água por convecção é desprezada no programa de cálculo devido ao grau de dificuldade em quantificar os fluxos de ar que atravessam as juntas ou outras zonas do elemento construtivo susceptíveis de serem atravessadas por calor ou por vapor de água, e por estas ocorrerem raramente no transporte unidimensional [41]. A radiação por onda-longa é tida em conta na *condutância térmica superficial* (vd. Subcapítulo 4.2.3.1).

Os seguintes mecanismos de transporte de humidade sob a forma líquida não são consideradas pelo programa de cálculo: a humidade ascensional devido à gravidade; o fluxo hidráulico devido a diferenças de pressão; a *electrokinetic*; e a osmose.

Uma vez que a versão<sup>1</sup> do WUFI® utilizada na presente dissertação apenas trata o transporte unidimensional, logo, não é possível considerar a influência da gravidade [31]. Os três restantes mecanismos não são considerados, uma vez que apenas ocorrem em condições especiais em edifícios, e porque ainda não existem modelos de transporte que os consigam descrever correctamente [22].

### 2.1. Transporte de calor

O transporte de calor ocorre através de três mecanismos distintos: a condução, a convecção e a radiação. Enquanto a condução e a convecção requerem a existência de contacto directo entre os elementos em que ocorre o transporte de calor, tal não acontece com a radiação [19]. A condução está associada à transmissão de calor em corpos sólidos e fluídos<sup>2</sup>, e a convecção apenas a fluídos.

Em relação ao transporte do calor é ainda fundamental descrever de que forma se processam as trocas de calor entre um elemento construtivo e os climas fronteira, descrever o fenómeno de *Night-time long-wave radiation cooling*, e apresentar as equações de temperatura superficial exterior e interior.

<sup>1</sup> A versão do programa WUFI® utilizada na presente dissertação foi a 4.2 IBP – PRO.

<sup>2</sup> Caso não estejam reunidas as condições para que o transporte de calor seja efectuado através de correntes de convecção, este será efectuado através de condução [19].

### 2.1.1. Mecanismos de transporte de calor

O presente subcapítulo consiste num breve resumo sobre os três mecanismos de transporte de calor (i.e. condução, convecção e radiação) de modo a facilitar a compreensão dos pressupostos em que o WUFI® se baseia e possibilitar a explicação dos resultados obtidos.

#### 2.1.1.1. Condução

A condução é um mecanismo de transmissão de calor entre elementos, que tem como potencial de transporte a diferença de temperatura entre os elementos em que ocorre a transmissão<sup>3</sup>. Por isso, caso a diferença de temperatura seja zero<sup>4</sup> não ocorre transmissão de calor e quanto maior for a diferença de temperatura, maior será a quantidade de calor transmitida. A transmissão de calor ocorre do elemento com valor de temperatura mais elevado, associado a um estado de agitação molecular superior, para o elemento de temperatura mais baixo, associado a um estado de agitação molecular inferior, e decorre até ser atingido o equilíbrio (i.e. até que a temperatura de ambos os elementos seja igual). A condução é caracterizada pela seguinte equação, que se denomina *Lei de Fourier*:

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad 2.1$$

Onde,

$q$  Fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];  
 $\lambda$  Condutibilidade térmica [W/m.K];  
 $T$  Temperatura absoluta [K].

A *condutibilidade térmica* é uma característica singular de cada material e representa o comportamento deste face à energia, sob a forma de calor, que o atravessa. Um aumento deste valor implica que o calor atravessa com uma maior facilidade o material, o que provoca maiores perdas térmicas. Quanto menor for este valor, mais dificilmente a energia atravessa o material, logo, menores são as perdas térmicas.

O transporte de calor num material pode ser caracterizado através do conceito fluxo de calor ou através do conceito quantidade de calor. Em seguida é apresentada a equação que estabelece a relação entre estes dois conceitos:

$$q = \frac{Q}{S} \quad 2.2$$

Onde,

$q$  Fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];  
 $Q$  Quantidade de calor [W];  
 $S$  Área perpendicular à direcção do fluxo de calor [m<sup>2</sup>].

#### 2.1.1.2. Convecção

A convecção também possui o diferencial de temperatura como potencial de transporte, mas apenas ocorre em fluídos. No âmbito de física das construções o fluido de interesse é o ar. Existem dois tipos de convecção: a natural, convecção que ocorre devido a um diferencial de temperatura; e a forçada, convecção que é induzida a ocorrer por uma acção solicitante (e.g. força do vento).

A um aumento da temperatura do ar está associado um aumento do estado de agitação das suas moléculas, o que implica um afastamento entre estas. Este afastamento provoca uma diminuição do número de moléculas por unidade de volume, ou seja, a diminuição da massa volúmica. O processo físico que ocorre quando o ar quente, com menor massa volúmica, ascende e o ar frio, com maior massa

<sup>3</sup> Uma vez que se trata de uma diferença de temperaturas os resultados podem ser apresentada em graus Celsius (temperatura,  $\theta$ ) ou em Kelvins (temperatura absoluta,  $T$ ).

<sup>4</sup> Uma diferença de temperatura nula implica que ambos os elementos tenham a mesma temperatura.

volúmica, tende a descer para a zona anteriormente ocupada pelo ar quente, denomina-se *corrente de convecção*.

Caso as condições necessárias para que o transporte de calor ocorra através de correntes de convecção não estejam reunidas, este ocorrerá através da condução. Por exemplo, considerando um elemento construtivo horizontal (e.g. uma laje de cobertura), em condições de Verão<sup>5</sup>, o fluxo é descendente, logo não é possível a existência de correntes de convecção, pois o ar quente já se encontra no tecto do compartimento. Por esta razão, a transmissão de calor é apenas efectuada através de condução entre as camadas adjacentes de ar [19].

A convecção é expressa pela seguinte equação, que se denomina *Lei do Arrefecimento de Newton*:

$$q = h_c \cdot (T_1 - T_2) \quad 2.3$$

Onde,

$q$  Fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];

$h_c$  Condutância térmica por convecção [W/m<sup>2</sup>.K];

$T_1$  e  $T_2$  Temperatura absoluta [K].

A *condutância térmica por convecção* caracteriza o comportamento da camada de ar estável adjacente à superfície. Este parâmetro tem em conta a transmissão de calor por convecção entre a superfície e o meio ambiente. De realçar que se considera  $T_1$  superior a  $T_2$ , e que, como se trata de uma diferença, é indiferente a unidade da temperatura (i.e. pode ser em graus Celsius ou Kelvins).

### 2.1.1.3. Radiação

Um material emite radiação para o meio envolvente e a quantidade máxima de energia possível de ser emitida é expressa pela seguinte equação, que se denomina *Lei de Stefan-Boltzman*:

$$Q_{\max} = S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.4$$

Onde,

$Q_{\max}$  Quantidade de energia emitida de um corpo negro [W/m<sup>2</sup>];

$S$  Área [m<sup>2</sup>];

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzman<sup>6</sup> [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>];

$T$  Temperatura absoluta [K].

É importante referir que o *corpo negro* é um conceito teórico utilizado na quantificação da radiação emitida pelos materiais, pois corresponde ao valor máximo desta. O corpo negro consiste num material que, para além de absorver qualquer tipo de radiação incidente, emite toda a radiação absorvida para o meio envolvente, quer isto dizer que se trata de um emissor perfeito.

A *emissividade* consiste no quociente entre a quantidade de energia emitida pelo material e a quantidade de energia emitida por um corpo negro (i.e. o valor máximo atingível), que permite caracterizar o comportamento de um material face à quantidade de energia que este emite. Quanto maior for o valor de emissividade, maior é a capacidade de emissão do material, variando entre zero e o valor unitário.

A partir do conceito de emissividade e da equação 2.4 é possível determinar a equação que expressa a quantidade de energia emitida por um material real:

$$Q = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad 2.5$$

Onde,

$Q$  Quantidade de energia emitida por um material real [W/m<sup>2</sup>];

<sup>5</sup> Entende-se por condições de Verão quando a temperatura do meio ambiente interior é inferior à do exterior, e consequentemente o fluxo de calor ocorre no sentido do clima interior.

<sup>6</sup> A constante de Stefan-Boltzman assume o valor  $5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>.

$S$	Área [m <sup>2</sup> ];
$\varepsilon$	Emissividade [-];
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ];
$T$	Temperatura absoluta [K].

O *coeficiente de absorção* consiste no quociente entre a quantidade de energia absorvida pelo material e a quantidade de energia que incide no material. Este conceito permite caracterizar o comportamento de absorção de um material em relação à radiação, variando entre zero e o valor unitário, que corresponde a um material que absorve toda a energia incidente (i.e. corpo negro). Quanto maior foi o coeficiente de absorção, maior é a quantidade de energia absorvida pelo material.

A quantidade de calor trocada entre a superfície de um material e o meio envolvente, assumindo que o meio envolvente funciona como um corpo negro e que o material está sujeito às condições da *lei de Kirchhoff*<sup>7</sup>, é expressa pela seguinte equação:

$$Q = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{env}^4) \quad 2.6$$

Onde,

$Q$	Quantidade de energia transmitida entre a superfície do material e o meio ambiente [W/m <sup>2</sup> ];
$S$	Área [m <sup>2</sup> ];
$\varepsilon$	Emissividade [-];
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ];
$T_s$	Temperatura absoluta da superfície do material [K];
$T_{env}$	Temperatura absoluta da envolvente [K].

Apesar de compreender um diferencial de temperatura, tal como a *lei de arrefecimento de Newton*, é necessário respeitar as unidades, já que as temperaturas são elevadas à quarta potência. A unidade da temperatura é o Kelvin, já que a *constante de Stefan-Boltzman* é expressa em W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>.

Em alternativa à equação 2.6 é possível recorrer à seguinte equação para calcular as trocas de calor entre o meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo:

$$Q = S \cdot h_r \cdot (T_s - T_{env}) \quad 2.7$$

Onde,

$Q$	Quantidade de energia transmitida entre a superfície do material e o meio ambiente [W/m <sup>2</sup> ];
$S$	Área [m <sup>2</sup> ];
$h_r$	Condutância térmica por radiação [W/m <sup>2</sup> .K];
$T_s$	Temperatura absoluta da superfície do material [K];
$T_{env}$	Temperatura absoluta da envolvente [K].

### 2.1.2. Trocas de calor entre um meio ambiente e o respectivo paramento

As *trocas de calor* entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo são influenciadas por uma camada de ar estável adjacente à superfície. Esta camada existe devido aos mecanismos de condução, convecção e radiação que criam uma resistência à transferência de calor diminuindo o seu transporte. Este efeito é contabilizado através do conceito *condutância térmica superficial*, que varia consoante as condições do meio ambiente.

O potencial de transporte das trocas de calor entre um meio ambiente e o respectivo paramento é a diferença de temperatura entre os dois. As trocas de calor são expressas pela seguinte equação:

---

<sup>7</sup> A *lei de Kirchhoff* enuncia que a emissividade e o coeficiente de absorção de um corpo são iguais. Este conceito requer que o meio envolvente seja isotérmico e que funcione como corpo negro.



$$q = h \cdot (T_a - T_s) \quad 2.8$$

Onde,

- $q$  Fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];  
 $h$  Condutância térmica superficial [W/m<sup>2</sup>.K];  
 $T_a$  Temperatura do meio ambiente [K];  
 $T_s$  Temperatura da superfície do elemento construtivo em contacto com o meio ambiente [K].

A *condutância térmica superficial*, que contabiliza a resistência térmica adjacente ao elemento construtivo devido aos mecanismos de transporte de calor, é expressa pela seguinte equação:

$$h = h_c + h_r \quad 2.9$$

Onde,

- $h$  Condutância térmica superficial [W/m<sup>2</sup>.K];  
 $h_c$  Condutância térmica por convecção [W/m<sup>2</sup>.K];  
 $h_r$  Condutância térmica por radiação [W/m<sup>2</sup>.K].

A *condutância térmica por convecção* tem em conta as trocas de calor por condução, entre a camada de ar adjacente à superfície e a superfície, e por convecção, através das correntes de convecção. É um valor de cálculo complexo e depende da temperatura, das características do vento incidente (i.e. intensidade e direcção) e das características da fachada (i.e. inclinação e orientação) [41].

A *condutância térmica por radiação* tem em conta as trocas de calor através de radiação por onda-longa entre o paramento e as redondezas. É um valor que depende da temperatura à quarta potência, dos materiais, das características da superfície, e do tamanho e arranjo geométrico das superfícies que influenciam o paramento do elemento construtivo [41]. A radiação solar absorvida é contabilizada pelo *factor de absorção de radiação por onda-curta* (vd. Subcapítulo 4.2.3.3).

Ambas as condutâncias são dependentes do meio ambiente considerado, uma vez que cada meio influencia de forma distinta a *condutância térmica superficial*. No ambiente exterior a componente de convecção da *condutância térmica superficial* é superior à de radiação, uma vez que se trata de uma convecção forçada (i.e. accionada por uma força externa, como o vento). Enquanto no ambiente interior a componente de radiação é superior à de convecção, uma vez que se trata de convecção natural (i.e. accionada pela diferença de temperatura). A *condutância térmica superficial exterior* varia consoante as características do vento e da fachada, enquanto a *condutância térmica superficial interior* permanece constante (vd. Subcapítulo 5.1.4).

### 2.1.3. Arrefecimento nocturno

O arrefecimento nocturno (i.e. *Night-time long-wave radiation cooling*) é o fenómeno de transporte de calor, também conhecido como *overcooling* [41], em que as trocas de calor por convecção e por radiação ocorrem em sentidos opostos. Este fenómeno ocorre durante o dia e durante a noite, no entanto, durante a noite as perdas de calor que causa não são compensadas pela radiação solar, logo, torna-se relevante contabilizar este fenómeno nas análises higrótérmicas efectuadas.

O balanço de radiação que uma fachada se encontra sujeita depende do comportamento do edifício em relação à radiação, e também da radiação atmosférica<sup>8</sup> e da radiação terrestre<sup>9</sup> [3].

Os constituintes da atmosfera são fracos emissores térmicos, no entanto, os gases de efeito de estufa são capazes de emitir radiação por onda-longa devido à sua composição molecular. Ao contrário dos sólidos e dos líquidos, os gases de efeito de estufa não emitem radiação para todos os comprimentos de onda.

<sup>8</sup> A radiação por onda-longa emitida pela atmosfera e pelas nuvens.

<sup>9</sup> É a soma da radiação por onda-longa emitida pelas superfícies terrestres (e.g. fachadas de outros edifícios, obstáculos).

Por isso, ao comparar-se um gás com um sólido à mesma temperatura é perceptível que a quantidade de radiação emitida pelo gás é menor que a quantidade de radiação emitida pelo sólido.

A radiação terrestre possui a mesma ordem de grandeza que a radiação emitida pela fachada. No entanto, a radiação atmosférica não partilha dessa ordem de grandeza, já que não emite radiação para todos os comprimentos de onda. Por isso, a quantidade de energia emitida pela fachada é superior à quantidade de energia que esta absorve a partir da envolvente, logo, existe uma perda contínua de energia no sentido do clima exterior.

Durante o dia a perda de energia causada pela radiação atmosférica não se sente, uma vez que o calor oriundo da radiação solar incidente na fachada compensa as perdas térmicas. No entanto, durante a noite não ocorre tal compensação, e de uma forma geral, a *temperatura superficial exterior* é inferior à temperatura do meio ambiente exterior, aumentando a possibilidade da proliferação de colonizações biológicas [41].

As nuvens podem compensar parcialmente ou totalmente a diferença entre a quantidade de energia emitida e a quantidade de energia absorvida pela fachada [41]. As perdas por radiação também são influenciadas pela inclinação da fachada. Enquanto as superfícies horizontais (e.g. laje de cobertura) apenas trocam radiação com a atmosfera, o que implica uma influência muito significativa do fenómeno do arrefecimento nocturno, as superfícies verticais (e.g. paredes) trocam radiação com a atmosfera e com a superfície terrestre, logo, apenas nas trocas com a atmosfera existem perdas térmicas [41].

Ao ocorrer arrefecimento nocturno o fluxo de calor devido à radiação e o fluxo de calor devido à convecção têm sentidos opostos. Enquanto a superfície emite radiação para o clima exterior, a convecção ocorre no sentido da superfície, já que a temperatura do meio ambiente exterior é superior à *temperatura superficial exterior*. Por isso, não é possível recorrer à equação 2.8 para caracterizar as trocas de calor tendo em conta o fenómeno do arrefecimento nocturno.

#### 2.1.4. Temperatura superficial exterior e interior

A *temperatura superficial exterior*, em regime permanente, tem em conta o contributo do calor oriundo do elemento construtivo, o contributo da temperatura do meio ambiente exterior e o contributo da radiação solar incidente. Contudo, devido à radiação solar a *temperatura superficial exterior* torna-se superior à temperatura do meio ambiente exterior sendo calculada através da seguinte equação:

$$T_{se} = T_e + \frac{a_s \cdot I}{h_{ext}} \quad 2.10$$

Onde,

- $T_{se}$  Temperatura superficial exterior [K];
- $T_e$  Temperatura do meio ambiente exterior [K];
- $a_s$  Factor de absorção de radiação por onda-curta [-];
- $I$  Intensidade da radiação solar vertical à superfície exterior do elemento construtivo [W/m<sup>2</sup>];
- $h_{ext}$  Condutância térmica superficial [W/m<sup>2</sup>.K].

A *temperatura superficial interior*, em regime permanente, tem em conta o contributo do calor oriundo do elemento construtivo e o contributo da temperatura do meio ambiente interior, sendo calculada através da seguinte equação:

$$T_{si} = T_i - \frac{1}{h_{int}} \times U \times (T_i - T_e) \quad 2.11$$

Onde,

- $T_{si}$  Temperatura superficial interior [K];
- $T_i$  Temperatura do meio ambiente interior [K];
- $h_{int}$  Condutância térmica superficial interior [W/m<sup>2</sup>.K];

$U$  Coeficiente de transmissão térmica [ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ];  
 $T_e$  Temperatura do meio ambiente exterior [ $\text{K}$ ].

## 2.2. Transporte de humidade

A humidade no interior do elemento construtivo pode existir nos seus três estados (i.e. gasoso, líquido e sólido), no entanto, o transporte de humidade sob a fase líquida ocorre através da difusão de superfície e de condução capilar, e sob a fase gasosa apenas ocorre através da difusão de vapor de água. As trocas de humidade que ocorrem nas superfícies dos elementos construtivos são governadas pelas condições dos climas fronteira.

O presente subcapítulo descreve em primeiro lugar os mecanismos de transporte de humidade sob a fase líquida, i.e. a difusão de superfície e a condução capilar; em segundo lugar o mecanismo de transporte de humidade na fase gasosa, i.e. difusão de vapor de água; e por último os mecanismos de troca de humidade entre o meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo.

### 2.2.1. Transporte de água líquida

O transporte de água líquida engloba dois mecanismos distintos: a difusão de superfície; e a condução capilar. No transporte de humidade na fase líquida é necessário distinguir os domínios compreendidos na curva de armazenamento de humidade, já que num material higroscópico a difusão de superfície ocorre no domínio higroscópico e a condução capilar ocorre no domínio capilar. O domínio de supersaturação não é tido em conta devido às razões enunciadas em 2.3.3.

#### 2.2.1.1. Difusão de superfície

A difusão de superfície ocorre nas camadas de moléculas de água adsorvidas nas paredes dos poros dos materiais higroscópicos. É um mecanismo de transporte de humidade na fase líquida e o seu gradiente de transporte é a humidade relativa.

Na região higroscópica de um material ocorre a adsorção das moléculas de água nas paredes dos poros (i.e. *sportive film*). O aumento da humidade relativa promove o aumento da espessura da camada de moléculas de água adsorvidas. É importante relembrar que o valor da humidade relativa varia ao longo do elemento construtivo, o que consequentemente implica que o valor da espessura da camada também varie ao longo do elemento construtivo. Um gradiente de humidade relativa implica que ocorra um transporte de massa na camada de moléculas de água adsorvidas provocada pela diferença de espessura desta camada.

O transporte de massa através da difusão de superfície tem um papel significativo em materiais higroscópicos para humidades relativas acima dos 50% e pode ultrapassar o contributo da difusão de vapor de água pura [27]. A intensidade do transporte de massa através da difusão de superfície é directamente proporcional à temperatura ([2],[40]).

De modo a que não ocorram erros de cálculo a difusão de superfície é associada à condução capilar através de uma técnica de cálculo que é independente da difusão de vapor de água [31].

#### 2.2.1.2. Condução capilar

A dificuldade em descrever a complexa estrutura sólida de um material devido à constante alteração da secção do poro e das interligações impossibilita a utilização de um modelo matemático. Deste modo recorre-se a aproximações matemáticas derivadas de um modelo teórico que se baseia e é comprovado por ensaios experimentais [27].

O modelo dos poros de dimensão igual recorre à *equação de Bernaoulli* para a hidrodinâmica e à *lei de Hagen-Poiseuille* para fluxos através de tubos de modo a obter a *profundidade de penetração da água*:

$$X = B \cdot \sqrt{t} \quad 2.12$$

Onde,

$X$  Profundidade de penetração da água [m];  
 $B$  Coeficiente de penetração da água [ $\text{m/s}^{0.5}$ ];  
 $t$  Tempo [s].

Ao multiplicar a equação 2.12 pela massa volúmica da água é possível obter a quantidade de água absorvida pelo material enquanto é fornecida água ao material.

$$m_w = A \cdot \sqrt{t} \quad 2.13$$

Onde,

$m_w$  Quantidade de água absorvida [ $\text{kg/m}^2$ ];  
 $A$  Coeficiente de absorção de água [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ];  
 $t$  Tempo [s].

O *coeficiente de capilaridade* e o *coeficiente de penetração da água* relacionam-se através da seguinte equação [19]:

$$A = \rho_w \cdot B \quad 2.14$$

Onde,

$A$  Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ ];  
 $\rho_w$  Massa volúmica da água [ $\text{kg/m}^3$ ];  
 $B$  Coeficiente de penetração [ $\text{m/s}^{0.5}$ ].

É possível afirmar, e considerando a constância da massa volúmica da água<sup>10</sup>, que um maior valor de *coeficiente de capilaridade* implica um maior valor de *coeficiente de penetração da água*, portanto, quanto maior o valor do *coeficiente de capilaridade*, mais elevada é a velocidade de migração da água no material.

A equação 2.13 permite calcular a quantidade de água absorvida pelo material. No entanto, não permite retirar conclusões sobre o fenómeno de equilíbrio capilar ou sobre a distribuição da água no interior de um material. Para além destas limitações esta metodologia de cálculo considera uma frente de humidade que penetra no material bem definida. Contudo, esta situação não representa a realidade, já que existe sempre um gradiente de teor de água causado pelos poros interligados que variam de tamanho, e consequentemente de pressão capilar e de resistência ao fluxo de água.

No modelo dos poros interligados com volume cilíndrico a condução capilar é descrita através da seguinte equação de difusão:

$$g_w = -D_w(w) \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \quad 2.15$$

Onde,

$g_w$  Fluxo de transporte de humidade na fase líquida [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ];  
 $D_w(w)$  Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida [ $\text{m}^2/\text{s}$ ];  
 $w$  Teor de água [ $\text{kg/m}^3$ ].

O coeficiente de transporte de humidade na fase líquida relaciona a pressão capilar e o teor de água, sendo fortemente dependente da quantidade de humidade no interior de um material. A dependência da

---

<sup>10</sup> Varia em função da temperatura e da pressão.

condução capilar relativamente à temperatura deve-se à dependência da viscosidade do fluido em relação à temperatura e não à dependência da tensão de superfície em relação à temperatura, já que esta é pouco significativa [27].

Em alternativa a condução capilar pode ser descrita através da seguinte equação:

$$g_w = -D_\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad 2.16$$

Onde,

$g_w$  Fluxo de transporte de humidade na fase líquida [kg/m<sup>2</sup>.s];  
 $D_\varphi$  Coeficiente de condução de humidade na fase líquida [kg/m.s];  
 $\varphi$  Humidade relativa [-].

A vantagem em recorrer à equação 2.16 em detrimento da equação 2.15 é que esta possui um potencial de transporte independente do material e contínuo na zona de transição entre camadas [31].

Uma vez que o fluxo de humidade na fase líquida tem de ser idêntico para ambas as equações, o coeficiente de transporte de humidade na fase líquida relaciona-se com o coeficiente de transporte capilar através da seguinte equação [31]:

$$D_\varphi = D_w(w) \cdot \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad 2.17$$

Onde,

$D_\varphi$  Coeficiente de condução de humidade na fase líquida [kg/m.s];  
 $D_w(w)$  Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida [m<sup>2</sup>/s];  
 $w$  Teor de água [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\varphi$  Humidade relativa [-].

## 2.2.2. Transporte de vapor de água

O transporte de vapor de água ocorre por difusão, com a pressão parcial de vapor de água como gradiente de transporte. De notar que a partir do *teor de água crítico* torna-se mais difícil o transporte de vapor de água, já que a maioria dos poros se encontra preenchida por água líquida, e quando se atinge o *teor de água de saturação* passa apenas a ocorrer transporte de humidade na fase líquida.

### 2.2.2.1. Difusão de vapor de água

A difusão é o mecanismo de transporte de vapor de água no meio ambiente que é caracterizada pela *Lei de Fick* e tem como potencial de transporte a pressão parcial de vapor de água. Este mecanismo é expresso pela seguinte equação:

$$g_v = -\delta \cdot \nabla P_v \quad 2.18$$

Onde,

$g_v$  Fluxo de difusão de vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s];  
 $\delta$  Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/m.s.Pa];  
 $P_v$  Pressão parcial de vapor de água [Pa].

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar depende da temperatura absoluta<sup>11</sup> e da pressão atmosférica do meio ambiente, e é expresso através da seguinte equação [11]:

$$\delta = \frac{2,0 \cdot 10^{-7} \times T_a^{0,81}}{P_L} \quad 2.19$$

Onde,

$\delta$  Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/m.s.Pa];  
 $T_a$  Temperatura absoluta do meio ambiente [K];  
 $P_L$  Pressão atmosférica do meio ambiente [Pa].

A difusão de vapor de água nos materiais porosos também é caracterizada pela *Lei de Fick*, possuindo o mesmo potencial de transporte. Contudo, a difusão num material poroso ocorre através do ar que se encontra no interior dos poros, o que implica a necessidade de superar uma resistência distinta da existente no meio ambiente. Esta diferença deve-se: à porosidade do material; aos trajectos impostos pela estrutura sólida do material e aos efeitos da adsorção nas paredes dos poros [31]; e é contabilizada através do *factor de resistência à difusão de vapor*<sup>12</sup>. A difusão num material poroso é expressa pela seguinte equação:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla P_v \quad 2.20$$

Onde,

$g_v$  Fluxo de difusão de vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s];  
 $\delta$  Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/m.s.Pa];  
 $\mu$  Factor de resistência à difusão de vapor [-];  
 $P_v$  Pressão parcial de vapor de água [Pa].

O *factor de resistência à difusão de vapor* é singular para cada material e é expresso pela seguinte equação:

$$\mu = \frac{\delta}{\delta_m} \quad 2.21$$

Onde,

$\mu$  Factor de resistência à difusão de vapor [-];  
 $\delta$  Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/m.s.Pa];  
 $\delta_m$  Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material [kg/m.s.Pa];

O *coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material* consiste na quantidade de vapor de água que atravessa uma espessura unitária, num intervalo de tempo unitário e devido a uma diferença de pressão parcial unitária. O *coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material* é singular para cada material e quanto menor for o seu valor, mais impermeável ao vapor de água será o material.

O valor do *factor de resistência à difusão de vapor* aumenta consoante diminui a permeabilidade ao vapor de água do material (i.e. dificulta a difusão ao vapor de água) e diminui consoante aumenta a permeabilidade ao vapor de água do material (i.e. facilita a difusão ao vapor de água).

Assume-se a constância do *factor de resistência à difusão de vapor* em função da humidade relativa, uma vez que é independente da temperatura e da pressão. Contudo, esta consideração não se verifica para elevados valores de humidade relativa, uma vez que a difusão de superfície<sup>13</sup> se torna mais relevante

<sup>11</sup> Temperatura em Kelvins.

<sup>12</sup> O *factor de resistência à difusão de vapor* permite demonstrar o quanto a resistência à difusão de vapor de uma camada de material ultrapassa a resistência à difusão de uma camada de ar com igual espessura [27].

<sup>13</sup> É um mecanismo de transporte de água líquida com a humidade relativa como potencial de transporte (vd. Subcapítulo 2.2.1.1).

a esse nível, implicando a diminuição do *factor de resistência à difusão de vapor* (vd. Subcapítulo 4.1.2.4.).

### 2.2.2.2. Humidade relativa e pressão parcial

A humidade relativa é uma relação entre a pressão parcial de vapor de água, parcela da pressão atmosférica total que é exercida pelo vapor de água, e a pressão de saturação de vapor de água, pressão máxima de vapor de água no ar para uma determinada temperatura. Esta relação é expressa de acordo com a seguinte equação:

$$HR = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \times 100 \quad 2.22$$

Onde,

$HR$  Humidade relativa [%];

$P_v$  Pressão parcial de vapor de água [Pa];

$P_{v,sat}$  Pressão de saturação de vapor de água [Pa].

A pressão de saturação de vapor de água é obtida de acordo com as seguintes equações:

$$P_{v,sat} = 611 \times \exp\left(\frac{22,44 \times \theta}{272,44 + \theta}\right) \quad se \quad \theta < 0^\circ C \quad 2.23$$

$$P_{v,sat} = 611 \times \exp\left(\frac{17,08 \times \theta}{234,18 + \theta}\right) \quad se \quad \theta \geq 0^\circ C \quad 2.24$$

Onde,

$P_{v,sat}$  Pressão de saturação [Pa];

$\theta$  Temperatura [ $^\circ C$ ].

Apenas a título de curiosidade é de salientar que para todas as simulações referidas na presente dissertação não foi necessário recorrer à equação 2.23, uma vez que a temperatura do meio ambiente exterior<sup>14</sup> em Lisboa nunca é inferior a zero graus Celsius (vd. Subcapítulo 5.1.1).

### 2.2.3. Trocas de vapor de água entre o meio ambiente e respectivo paramento

As trocas de humidade entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo podem ocorrer sob a forma de vapor de água, tendo como potencial de transporte a pressão parcial de vapor de água.

Nas trocas de vapor de água, tal como nas trocas de calor, existe uma resistência à transferência de vapor de água adjacente aos paramentos do elemento construtivo. Contudo, neste caso a resistência deve-se à difusão de massa e é contabilizada através do *coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão*. Este coeficiente pode ser obtido através de um gradiente de pressão ou um gradiente de concentração. No programa de cálculo WUFI® recorre-se ao gradiente de pressão.

Na transferência de vapor de água o potencial de transporte é o gradiente de pressão parcial de vapor de água, onde o transporte ocorre no sentido do elemento com menor valor inferior de pressão parcial de

<sup>14</sup> É no meio ambiente exterior que são atingidos os valores de temperatura mais reduzidos, logo, é a situação condicionante.

vapor de água. As trocas de vapor de água<sup>15</sup> entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo são expressas através da seguinte equação:

$$g_v = \beta_p \cdot (P_v - P_{v,\text{sup}}) \quad 2.25$$

Onde,

- $g_v$  Fluxo de vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s];
- $\beta_p$  Coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa];
- $P_v$  Pressão parcial do meio ambiente [Pa];
- $P_{v,\text{sup}}$  Pressão parcial na superfície do elemento construtivo em contacto com meio ambiente [Pa].

O *coeficiente de transferência de vapor para gradiente de pressão* é obtido tendo em conta a *condutância térmica por convecção*. Uma vez que a condutância depende das características do vento e da fachada, também o *coeficiente de transferência de vapor de água* depende destas características. Por esta razão o coeficiente varia para o meio ambiente exterior, e é constante para o meio ambiente interior ao longo do ano de referência (vd. Subcapítulo 5.1.5). Este coeficiente é obtido através da seguinte equação:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \times h_c \quad 2.26$$

Onde,

- $\beta_p$  Coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão [kg/m<sup>2</sup>.s.Pa];
- $h_c$  Condutância térmica por convecção [W/m<sup>2</sup>.K].

Em relação à pressão parcial de vapor de água o programa apresenta apenas os valores referentes aos paramentos exterior e interior, e aos pontos de monitorização adoptados. Os valores são apresentados em hectopascals. Contudo, com a informação disponibilizada pelo programa, nomeadamente a humidade relativa e a temperatura, é possível obter a pressão parcial de vapor de água para o meio ambiente exterior e interior através da humidade relativa e da pressão de saturação.

A *pressão de saturação de vapor de água* depende apenas da temperatura e é obtida recorrendo à equação 2.23 ou 2.24, consoante o valor da temperatura. Ao rearranjar a equação 2.22 e com os valores da pressão de saturação obtém-se a pressão parcial de vapor de água para o respectivo meio ambiente. Desta forma, é possível verificar qual é a diferença entre as pressões parciais do meio ambiente e do respectivo paramento do elemento construtivo, possibilitando ainda o cálculo do fluxo de vapor de água.

As constantes utilizadas na equação 2.23 e 2.24 variam de acordo com o documento de referência, para *Künzel* [31] os valores são obtidos a partir da *German Weather Service: Aspiration Psychrometer tables* [12] enquanto para *Henriques* [19] os valores são obtidos a partir da norma EN ISO 13788 [15]. Na presente dissertação optou-se por adoptar os valores da norma *German Weather Service: Aspiration Psychrometer tables* [12] para que os resultados obtidos através do programa de cálculo auxiliar (i.e. *MS Excel*) fossem iguais aos resultados obtidos através do programa WUFI®.

## 2.3. Adsorção e Absorção

A humidade no interior de um elemento construtivo pode encontrar-se em estado sólido, líquido e gasoso. O estado que se encontra depende das condições dos climas fronteiras, que estão constantemente a sofrer alterações, o que torna difícil quantificar a humidade de acordo com o estado físico. De modo a não ser necessário esta distinção considera-se a soma de humidade nos três estados físicos, ou seja, o teor de água.

Um material pode absorver humidade até que os poros se encontrem completamente preenchidos por água. Contudo, é necessário estabelecer uma relação entre a quantidade de humidade no interior de um

<sup>15</sup> Existe a possibilidade da transferência de vapor de água entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo ser negativa. Este facto apenas implica que a pressão parcial de vapor de água no paramento do elemento construtivo é superior à do respectivo meio ambiente fazendo com que a transferência de massa ocorra no sentido do meio ambiente.



material e as condições dos climas fronteira. Em condições isotérmicas<sup>16</sup> esta relação é caracterizada pela *sorption isotherm*<sup>17</sup> e possui um desenvolvimento semelhante à letra S para materiais higroscópicos. Esta curva encontra-se subdividida em três domínios: o higroscópico (i.e. *sorption moisture region*); o capilar (i.e. *capillary water region*); e o de super-saturação (i.e. *supersaturated region*).

Nos materiais higroscópicos distinguem-se os três domínios. Contudo, nos materiais não higroscópicos apenas existe o domínio supersaturado (e.g. nos isolamento térmicos [31]). Quer isto dizer que apenas se encontra humidade sob a forma líquida quando a temperatura do material é inferior à *temperatura do ponto de orvalho*<sup>18</sup> (i.e. quando a humidade relativa é 100 %).

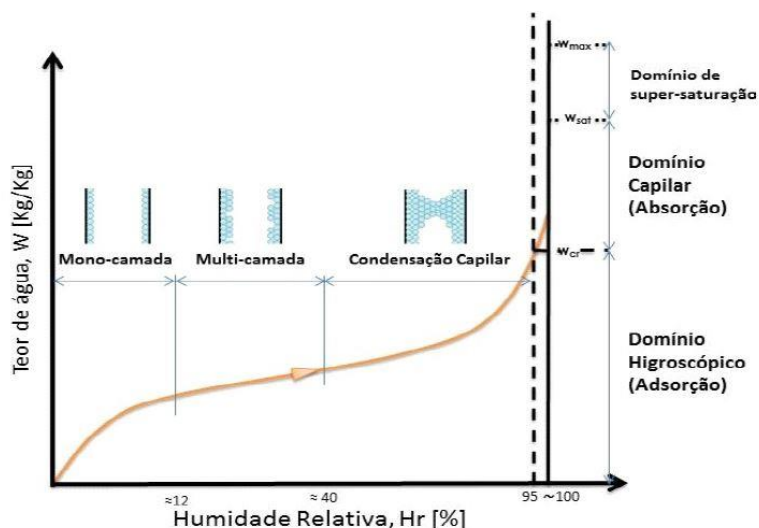


Figura 2.1 – Exemplo de curva de armazenamento de humidade de um material higroscópico, retirado de [19]

### 2.3.1. Domínio higroscópico

No domínio higroscópico o mecanismo de acréscimo de humidade deve-se à adsorção [19] e este domínio é composto pela *adsorção molecular*, que ocorre do valor do material no estado seco até aproximadamente aos 40% de humidade relativa, e pela *condensação capilar*, que ocorre aproximadamente dos 40 até aos 95% de humidade relativa.

A *adsorção molecular* consiste em primeiro lugar na *adsorção monomolecular* e em seguida na *adsorção plurimolecular*. A *adsorção monomolecular* consiste na constituição de uma camada sobre a superfície das paredes dos poros devido à deposição das moléculas de água, esta fase ocorre entre o valor do material no estado seco e os 12% de humidade relativa. A *adsorção plurimolecular* consiste na deposição de moléculas de água sobre a monocamada e o consequente aumento da espessura da camada de moléculas, esta fase ocorre entre os 12 e os 40% de humidade relativa.

A *histeresis* consiste na diferença entre a *curva de adsorção* e a *curva desadsorção*<sup>19</sup>, uma vez que ocorrem a velocidades diferentes devido à forma e disposição dos poros. Contudo, de acordo com Künzel [32] na maioria dos materiais utilizados na construção civil esta diferença não é significativa, o que permite apenas recorrer à curva de adsorção para caracterizar um material no domínio higroscópico. Em caso de a diferença ser significativa é possível efectuar uma média entre as duas curvas [36].

<sup>16</sup> Transformação termodinâmica em que a temperatura é constante.

<sup>17</sup> O efeito da temperatura pode ser desprezado de acordo com as medições efectuadas por Kast e Jokisch de 20 a 70°C [25] e Künzel a 5 e 15°C [30]. Por esta razão é que se recorre a curvas isotérmicas para classificar o armazenamento de humidade no interior de um material.

<sup>18</sup> O ponto de orvalho consiste no valor de temperatura a partir de qual ocorre condensação para um dado valor de humidade relativa e temperatura do ar [19].

<sup>19</sup> É o processo inverso à adsorção, que ocorre quando a humidade relativa diminui e consequentemente diminui a quantidade de humidade no interior do material.

A *condensação capilar* ocorre devido ao contacto entre as camadas de água adsorvida e devido à tensão superficial do líquido, que implica a formação de meniscos. Contudo, a forma do menisco influencia o valor da pressão de saturação do poro, e consequentemente o valor a partir do qual ocorrem as condensações. Se o menisco for côncavo a pressão de saturação diminui em relação à de uma superfície de água plana, o que implica que ocorrem condensações no interior do poro abaixo dos 100% de humidade relativa. Se o menisco for convexo a pressão de saturação é superior à da superfície de água plana, ou seja, apenas ocorrem condensações acima dos 100% de humidade relativa. O valor a partir do qual ocorrem condensações no interior de um poro é descrito pela *lei de Kelvin*<sup>20</sup>:

$$\phi = e^{\left[ -\frac{P_c}{\rho_w \cdot R_D \cdot T} \right]} \quad 2.27$$

Onde,

- $\phi$  Humidade relativa [-];
- $P_c$  Pressão capilar [Pa];
- $\rho_w$  Massa volúmica da água [kg/m<sup>3</sup>];
- $R_D$  Constante de gases para ar seco<sup>21</sup> [J/kg.K];
- $T$  Temperatura absoluta [K].

É importante realçar que quanto maior for o valor do raio do poro, maior é o valor de humidade relativa a partir do qual ocorre condensação, uma vez que a pressão capilar é inversamente proporcional ao raio do poro e o aumento deste valor implica a redução do quociente, logo, uma maior humidade relativa.

### 2.3.2. Domínio capilar

No domínio capilar o mecanismo de acréscimo de humidade deve-se à absorção [19] e encontra-se limitado inferiormente pelo *teor de água crítico*<sup>22</sup> e superiormente pelo *teor de água de saturação*<sup>23</sup>. Este domínio está aproximadamente entre os 95 e os 98 % de humidade relativa, e recorre-se à *lei de Kelvin* para obter o teor de água a partir da humidade relativa.

A *histeresis* neste domínio para materiais de construção minerais não é significativa, tal como no domínio higroscópico, possibilitando recorrer apenas à curva de humedecimento para caracterizar o material no domínio capilar [31].

### 2.3.3. Domínio super-saturação

O domínio de super-saturação não é atingido através de sucção normal, uma vez que existem bolsas de ar no interior dos poros. É possível desfazer as bolsas de ar se existir contacto com a água durante um intervalo de tempo suficiente ([19],[27]).

Neste domínio a humidade relativa assume sempre o valor de 100 %, independentemente do valor do teor de água, e não existe uma relação entre a pressão capilar e o teor de água, uma vez que a dissolução das bolsas de ar alteram o valor do teor de água do material, mas não o valor da pressão capilar.

Dado que o humedecimento de um material para além do seu *teor de água de saturação* ocorre raramente sob condições naturais, no âmbito da física das construções o domínio supersaturado é desprezado [27].

<sup>20</sup> Permite relacionar o raio do poro e a humidade relativa para a qual ocorre condensação.

<sup>21</sup> A constante de gases para o ar seco assume um valor de 287,055 J/kg.K.

<sup>22</sup> O *teor de água crítico* corresponde à fronteira entre o domínio higroscópico e o domínio capilar.

<sup>23</sup> O *teor de água de saturação* corresponde ao valor máximo que um material higroscópico atinge através de absorção natural, ou seja, sob pressão normal e sem aplicação de forças exteriores.

## 2.4. Capilaridade

A capilaridade consiste no mecanismo de absorção de água líquida causada pela interacção entre o líquido e o ar que se encontram no interior dos poros. Este mecanismo depende das características da água, mais concretamente da tensão superficial, e das características da superfície, mais concretamente o ângulo de contacto. Em função do ângulo de contacto a pressão capilar é responsável pela ascensão (material hidrófilo,  $\theta < 90^\circ$ ) ou pela depressão (material hidrófobo,  $\theta > 90^\circ$ ) da curvatura do menisco.

Num poro parcialmente preenchido, a interface entre o líquido e o ar pode assumir uma superfície convexa ou côncava. A forma da superfície depende da tensão superficial do líquido e da tensão na interface entre o líquido e a parede do poro, que pode ser negativa ou positiva [27].

Na interface entre a água e o ar existe um diferencial de pressão entre a pressão do ar e a pressão da água, denominada pressão capilar<sup>24</sup>. Esta pressão é obtida através da seguinte equação:

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \times \cos \theta \quad 2.28$$

Onde,

- $P_c$  Pressão capilar [Pa];
- $P_{ar}$  Pressão do ar [Pa];
- $P_{água}$  Pressão da água [Pa];
- $\sigma$  Tensão superficial [N/m];
- $R_1, R_2$  Raios de curvatura [m];
- $\theta$  Ângulo de contacto [ $^\circ$ ].

A superfície curva do líquido cria uma pressão em direcção ao centro da curva (vd. Figura 2.2) que pode ser descrito pela seguinte equação, para um poro com secção transversal circular:

$$P_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad 2.29$$

Onde,

- $P_c$  Pressão capilar [Pa];
- $\sigma$  Tensão superficial [N/m];
- $\theta$  Ângulo de contacto [ $^\circ$ ];
- $r$  Raio do cilindro [m].

Considera-se um poro com uma secção transversal circular, já que é extremamente difícil construir um modelo capaz de reproduzir o arranjo espacial dos poros e a sua complexa influência no armazenamento e transporte de humidade [27]. Deve-se ter em atenção este aspecto nos resultados obtidos uma vez que se trata de uma simplificação.

É importante realçar de que forma varia a pressão capilar em relação à tensão superficial, ao ângulo de contacto e ao raio do poro. Em relação à tensão superficial, que é inversamente proporcional à temperatura [19], quanto mais elevado for o seu valor, maior será a pressão capilar. Relativamente ao ângulo de contacto quanto menor for o seu valor, que depende das propriedades do material, maior será a pressão capilar. Em relação ao raio do poro existe uma proporcionalidade inversa, ou seja, quanto menor for o valor do raio, maior será a pressão capilar.

Devido à relação entre o raio e a pressão capilar verifica-se que quanto maior for a dimensão do poro, menor será a pressão capilar que este exerce e menor será a sua resistência, logo, menor é a curvatura do menisco. Já que a pressão capilar é inversamente proporcional à dimensão dos poros, os primeiros a serem preenchidos são os poros de menor dimensão.

Em caso de contacto directo entre poros de dimensão distinta, o de menor dimensão vai exercer pressão sobre o de maior dimensão de forma a extrair humidade deste, até que atinga a saturação ou deixe de

---

<sup>24</sup> A pressão capilar também pode ser denominada sucção ou pressão de sucção.

exercer tal pressão. Pode deixar de exercer pressão caso ambos os meniscos possuam o mesmo raio de curvatura ou se o de maior dimensão esvaziar.

No caso de um material poroso com humidade no seu interior ser colocado em contacto directo com um material poroso em estado seco irá estabelecer-se um transporte de humidade do primeiro para o segundo até que seja atingido um estado de equilíbrio. O estado de equilíbrio é atingido quando a pressão capilar é igual para ambos os materiais e se possuírem diferentes porometrias os valores de teor de água atingidos no equilíbrio serão diferentes.

A tensão superficial depende da temperatura e o raio de curvatura depende do teor de água, o que implica que a pressão capilar também dependa destes parâmetros [17].

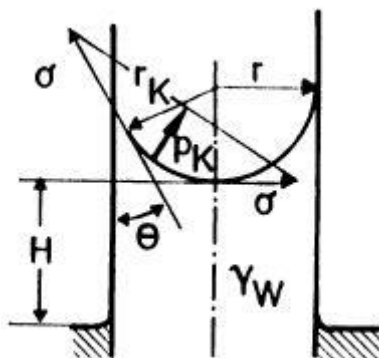


Figura 2.2 – Pressão capilar num poro com secção transversal circular, retirado de [27]

## 2.5. Chuva incidente

A chuva por si só, denominada chuva normal na presente dissertação, apenas compreende uma componente vertical, e por isso, não influencia de forma significativa o comportamento higrotérmico de um elemento construtivo vertical. Contudo, quando a chuva é sujeita à acção do vento, esta passa a admitir também uma componente horizontal, logo, embate mais facilmente nas superfícies verticais. Este tipo de chuva denomina-se chuva incidente em português e *wind-driven rain* (WDR) ou *driving rain* em inglês.

A chuva incidente é um conceito importante no estudo higrotérmico de elementos construtivos verticais pois trata-se da principal fonte de humidade no interior destes elementos [4], que por sua vez pode originar inúmeros problemas e inclusive ser responsável pela diminuição do período de vida útil destes elementos. Para além destes aspectos, o embate de chuva incidente ou mesmo a escorrência de água sobre a superfície vertical podem causar padrões de sujidade nas fachadas dos edifícios.

A quantidade de chuva incidente que embate numa superfície vertical depende dos seguintes factores [4]: geometria do edifício; tipologia do meio ambiente; orientação do elemento construtivo vertical; velocidade e direcção do vento; turbulência da intensidade; intensidade da chuva normal; distribuição do tamanho das gotas de água da chuva; e a duração da precipitação.

### 2.5.1. Métodos de caracterização da chuva incidente

A chuva incidente em superfícies verticais foi inicialmente caracterizada e quantificada através de métodos experimentais, em seguida surgiram os métodos semi-empíricos e mais recentemente os métodos numéricos. Em seguida será abordada de forma breve cada uma destas metodologias.

### 2.5.1.1. Métodos experimentais

Os métodos experimentais recorrem a pluviómetros (i.e. *WDR gauges*), que consistem em aparelhos que têm uma abertura vertical, para medir a chuva incidente. É possível distinguir dois tipos de medições: as medições em que a chuva incidente não é influenciada por obstáculos (i.e. *free WDR*); e as medições da chuva incidente em edifícios.

A principal constatação retirada a partir das investigações levadas a cabo por vários autores, tais como *Henriques* [21], recorrendo a pluviómetros não influenciados por obstáculos, foi que a chuva incidente é proporcional à velocidade do vento e à intensidade da chuva normal [4].

As investigações realizadas a partir de pluviómetros instaladas em edifícios permitiram caracterizar o padrão de molhagem das fachadas [4]: a fachada a barlavento sofre humedecimento devido à chuva incidente, enquanto as restantes permanecem relativamente secas; na fachada a barlavento o humedecimento provocado pela chuva incidente aumenta de baixo para cima e do centro para os lados<sup>25</sup>; no caso de edifícios altos e largos, a fachada a barlavento só sente o efeito da chuva incidente de forma significativa nos cantos superiores, na borda superior e nas bordas laterais da fachada; a intensidade da chuva incidente é proporcional à velocidade do vento e à intensidade da chuva normal.

### 2.5.1.2. Métodos semi-empíricos

A chuva incidente normalmente não é uma informação medida numa estação climatológica, sendo a velocidade e direcção do vento, e a intensidade da chuva normal informações normalmente medidas. Tornando-se assim imperativo que fosse possível calcular a chuva incidente a partir destas três informações. Estas metodologias de cálculo denominam-se métodos semi-empíricos.

As investigações levadas a cabo por *Hoppestad* na Noruega e *Lacy* no Reino Unido forneceram dois métodos semi-empíricos para calcular a chuva incidente: o *WDR index*; e o *WDR relationship*.

O *WDR index* tem origem na constatação que a chuva incidente é proporcional à velocidade do vento e à intensidade da chuva normal, sendo obtido através do produto entre ambos os conceitos. Inicialmente o *WDR index* tratava-se de uma medida de qualidade à exposição de um local à *free WDR*, no entanto, e após vários melhoramentos, tornou-se numa medida de quantidade de exposição de um elemento construtivo vertical à chuva incidente [4].

O *WDR relationship* estabelece uma relação entre a intensidade da chuva incidente e a informação normalmente registada numa estação climatológica através do coeficiente de chuva incidente. O principal inconveniente deste método é a obtenção de um coeficiente fidedigno, já que depende de vários parâmetros que estão relacionados com as condições da precipitação.

Actualmente encontra-se em vigor a norma ISO 15927-3:2009 [23] para determinar o índice de chuva incidente em superfícies verticais. Esta norma disponibiliza duas metodologias de cálculo do índice. A primeira metodologia recorre à informação horária do vento e da precipitação, e a segunda é uma alternativa que apenas deve ser aplicada quando não se dispõe da informação necessária para aplicar a primeira. A primeira metodologia compreende dois passos: I) Cálculo do índice anual e do índice persistente em campo aberto; II) Cálculo do índice anual e do índice persistente de parede.

Os métodos semi-empíricos providenciam estimativas grosseiras da quantidade de chuva incidente que embate nos elementos construtivos verticais, no entanto, nos casos em que seja necessário valores mais exactos é necessário recorrer aos métodos numéricos (e.g. zona abaixo do beirado).

---

<sup>25</sup> De uma forma geral os cantos superiores de uma fachada são o local onde o humedecimento é mais forte, seguidos da borda superior e das bordas laterais da fachada [4].

### 2.5.1.3. Método numérico

A complexidade da interacção entre a chuva incidente e os edifícios levou a que a investigação fosse direccionada para os métodos numéricos. Estes métodos consistem no uso de técnicas numéricas de modo a definirem o fluxo de vento, e consequentemente, o cálculo da trajectória das gotas de água.

A modelação numérica é uma ferramenta importante na investigação da chuva incidente pois permite a sua quantificação tanto espacial como temporal. Contudo, tem os inconvenientes de requerer um enorme trabalho de preparação, necessitar uma elevada capacidade computacional e um período de cálculo significativo, para além dos requisitos necessários de modo a que os resultados obtidos sejam realistas [4].

### 3. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA WUFI®

O presente capítulo inclui os seguintes aspectos: a descrição do método de funcionamento do programa WUFI®; a identificação dos dados necessários para que o programa possa funcionar; a descrição das formas de apresentação disponíveis no programa relativamente aos resultados obtidos a partir das simulações; e as limitações do programa.

#### 3.1. Metodologia de cálculo

No presente subcapítulo é descrito e analisado o método de cálculo do transporte simultâneo de calor e de humidade utilizado pelo programa WUFI®. Em primeiro lugar são descritas as equações a que o programa recorre no que diz respeito ao transporte de calor. Em segundo lugar efectua-se o mesmo procedimento relativamente ao transporte de humidade. E por último conjugando as equações de transporte de calor e de humidade obtêm-se as equações do transporte simultâneo.

##### 3.1.1. Transporte de calor

A quantidade de energia que existe no interior de um material consiste na soma da quantidade de energia proveniente dos climas fronteira (i.e. fluxo de calor) com a quantidade de energia proveniente ou consumida pela fonte ou dissipador de calor, respectivamente. A condensação por ser um processo exotérmico<sup>26</sup> considera-se uma fonte de calor, enquanto a evaporação por ser um processo endotérmico<sup>27</sup> considera-se um dissipador de calor. O balanço de energia é expresso pela seguinte equação:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla q + S_h \quad 3.1$$

Onde,

$H$  Entalpia total [J/m<sup>3</sup>];

$t$  Tempo [s];

$q$  Fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];

$S_h$  Fonte/dissipador de calor devido à condensação/evaporação [W/m<sup>3</sup>].

A entalpia é a quantidade de energia, sob a forma de calor, que se encontra num material sob condições isobáricas<sup>28</sup>. O material comporta-se de forma distinta caso exista humidade no seu interior, pois a entalpia deixa de ser caracterizada apenas pela entalpia do material no estado seco e passa a ser também caracterizada pela entalpia de humidade. Conclui-se que a entalpia total de um material é expressa através da seguinte equação:

$$H = H_s + H_w \quad 3.2$$

Onde,

$H$  Entalpia total [J/m<sup>3</sup>];

$H_s$  Entalpia do material seco [J/m<sup>3</sup>];

$H_w$  Entalpia da humidade no material [J/m<sup>3</sup>].

---

<sup>26</sup> As moléculas passam de um estado de agitação molecular superior para um estado de agitação inferior, logo, é libertada energia para o sistema, resultando num aumento de temperatura do sistema.

<sup>27</sup> No processo endotérmico é consumida energia do sistema, resultando numa diminuição da temperatura do sistema.

<sup>28</sup> Transformação termodinâmica em que se considera que a pressão é constante.

A quantidade de energia que reside no interior de um material no estado seco é expresso pela seguinte equação:

$$H_s = \rho_s \times c_s \times T \quad 3.3$$

Onde,

$H_s$  Entalpia do material seco [J/m<sup>3</sup>];  
 $\rho_s$  Massa volúmica do material seco [Kg/m<sup>3</sup>];  
 $c_s$  Capacidade específica do material [J/kg.K];  
 $T$  Temperatura absoluta [K].

A entalpia de humidade depende do estado físico em que a humidade se encontra, podendo encontrar-se no estado sólido (i.e. gelo), líquido (i.e. água) ou gasoso (i.e. vapor de água em condições de saturação). A variação da entalpia do vapor de água em saturação, que tem em conta o calor latente devido às mudanças de fase, é muito reduzida quando comparada com as variações de entalpia dos outros dois estados, logo, é desprezada [31]. A entalpia da humidade é composta pela entalpia referente à humidade no estado sólido e no estado líquido. Contudo, é necessário ter a noção que a alteração do estado físico implica variação da quantidade de energia que reside no interior do material, diminuindo-a ou aumentando-a conforme seja uma reacção endotérmica ou exotérmica. A entalpia da humidade contida no interior de um material é expressa através da seguinte equação:

$$H_w = \left[ w_e \times c_e + (w - w_e) \times c_w - h_e \times \frac{dw_e}{dT} \right] \times T \quad 3.4$$

Onde,

$H_w$  Entalpia da humidade no material [J/m<sup>3</sup>];  
 $w_e$  Teor de água da humidade no estado sólido [kg/m<sup>3</sup>];  
 $c_e$  Capacidade específica do gelo [J/kg.K];  
 $w$  Teor de água [kg/m<sup>3</sup>];  
 $c_w$  Capacidade específica da água líquida [J/kg.K];  
 $h_e$  Entalpia específica de fusão [J/kg];  
 $T$  Temperatura absoluta [K].

O fluxo de calor é a quantidade de energia sobre a forma de calor que atravessa um material, sendo esta energia proveniente dos climas fronteira. Este mecanismo de transporte de calor é accionado pelo gradiente de temperatura e é expresso pela equação 2.1.

A *condutibilidade térmica*, que traduz o comportamento do material face ao calor que o atravessa, varia em função do teor de água do material e conforme a equação 4.8. O suplemento  $b$  tem em conta o aumento da *condutibilidade térmica* consoante o aumento do teor de água, ou seja, o aumento da quantidade de humidade no interior de um material implica um aumento da quantidade de calor que atravessa o material, porque a *condutibilidade térmica* aumenta. O suplemento  $b$  e a massa volúmica do material seco são constantes ao longo do aumento do teor de água, mas são característicos de cada material.

A fonte de calor (i.e. *heat source*) e o dissipador de calor (i.e. *heat sink*) têm em conta a entalpia originada devido ao movimento do fluxo de humidade e à mudança do estado físico da humidade. O processo mais relevante de entalpia é a difusão de vapor de água com mudanças simultâneas de estado físico [31]. O calor gerado/dissipado é expresso pela seguinte equação:

$$S_h = -h_v \cdot \nabla g_v \quad 3.5$$

Onde,

$S_h$  Fonte/dissipador calor causado devido à condensação/evaporação [W/m<sup>3</sup>];  
 $h_v$  Calor latente de mudança de fase [J/kg];  
 $g_v$  Fluxo de vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s].



O calor latente de mudança de fase é composto pelo calor latente de evaporação da água (com o valor de 2500 kJ/kg) e a entalpia proveniente dos mecanismos de adsorção e absorção. Contudo, no intervalo de interesse para a física das construções (i.e. acima do 50% de humidade relativa) a entalpia específica de evaporação de água pura é bastante superior à entalpia devido aos mecanismos de adsorção e absorção na maioria dos materiais de construção, logo, é possível desprezar o seu contributo [31].

### 3.1.2. Transporte de humidade

A quantidade de humidade que reside no interior de um material consiste na soma dos fluxos de humidade provenientes dos climas fronteira (i.e. fluxo de difusão e condução capilar) com a quantidade de humidade proveniente da fonte ou consumida pelo dissipador de humidade. O balanço de humidade de um material é expresso pela seguinte equação:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \times (g_w + g_v) + S_w \quad 3.6$$

Onde,

- $w$  Teor de água [kg/m<sup>3</sup>];
- $g_w$  Fluxo de transporte de humidade no estado líquido [kg/m<sup>2</sup>.s];
- $g_v$  Fluxo de difusão de vapor de água [kg/m<sup>2</sup>.s];
- $S_w$  Fonte/dissipador de humidade [kg/m<sup>3</sup>.s].

A influência da fonte ou do dissipador de humidade são desprezadas das equações de transporte simultâneo de calor e de humidade. A primeira porque ocorre raramente e a segunda porque serve para caracterizar processos químicos (e.g. cura da argamassa), algo que não se enquadra no âmbito do programa de cálculo WUFI® [31].

O fluxo de difusão de vapor de água é expresso pela equação 2.20 e o fluxo de transporte de humidade no estado líquido é expresso pela equação 2.16.

### 3.1.3. Transporte simultâneo de calor e de humidade

O transporte de calor e de humidade encontram-se relacionados da seguinte forma [31]: a entalpia total depende da quantidade de humidade no interior do material, já que a entalpia de humidade depende do teor de água (vd. equação 3.4); a *condutibilidade térmica* depende do teor de água do material (vd. equação 4.8); o potencial de transporte da fonte ou do dissipador de calor é o fluxo de vapor de água (vd. equação 3.5); os potenciais de transporte de humidade no estado líquido e gasoso dependem da temperatura (vd. equação 2.16 e 2.20).

A resolução das equações de transporte simultâneo apenas é possível caso se considere apenas duas variáveis. As variáveis consideradas são a temperatura e a humidade relativa, uma vez que é possível obter as restantes variáveis de interesse (e.g. pressão de saturação de vapor de água) a partir destas.

Reescrevendo a equação 3.1 e a 3.6 de forma a dependerem apenas da temperatura e humidade relativa obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (\lambda \cdot \nabla \theta) + h_v \cdot \nabla (\delta_m \cdot \nabla (\varphi \times P_{v,sat})) \quad 3.7$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D_\varphi \cdot \nabla \varphi + \delta_m \cdot \nabla (\varphi \times P_{v,sat})) \quad 3.8$$

Onde,

- $\partial H / \partial \theta$  Capacidade de armazenamento de calor do material [J/m<sup>3</sup>.K];
- $\partial w / \partial \varphi$  Capacidade de armazenamento de humidade do material [kg/m<sup>3</sup>];

$H$	Entalpia total [kg/m <sup>3</sup> ];
$\theta$	Temperatura [°C];
$t$	Tempo [s];
$\lambda$	Condutibilidade térmica [W/m.K];
$h_v$	Calor latente de mudança de fase [J/kg];
$\delta_m$	Permeabilidade ao vapor de água do material [kg/m <sup>2</sup> .s.Pa];
$\varphi$	Humidade relativa [-];
$P_{v,sat}$	Pressão de saturação de vapor de água [Pa];
$w$	Teor de água [Kg/m <sup>3</sup> ];
$D_\varphi$	Coefficiente de transporte de humidade no estado liquido [kg/m.s].

O potencial de transporte do fluxo de vapor de água é o gradiente de pressão parcial (vd. equação 2.20), contudo, nas equações 3.7 e 3.8 esta variável é substituída pelo produto entre a humidade relativa e a pressão de saturação de vapor de água<sup>29</sup> (vd. equação 2.22) de forma a que as equações de transporte dependam apenas da humidade relativa e da temperatura.

## 3.2. Inputs

No presente subcapítulo são apresentados os dados necessários para que o programa de cálculo WUFI® resolva as equações de transporte simultâneo de calor e de humidade. Os dados necessários são os seguintes: as propriedades básicas e complementares dos materiais que compõem o elemento construtivo; os dados que descrevam o clima exterior e o clima interior; os coeficientes de transporte de superfície exterior e interior; e as condições iniciais dos materiais que compõem o elemento construtivo.

### 3.2.1. Propriedades dos materiais

Em relação às propriedades dos materiais o programa distingue dois tipos: as propriedades básicas, que são imprescindíveis para o funcionamento do programa; e as propriedades complementares, que podem não ser introduzidas. No entanto, a não introdução das propriedades complementares implica que nem todos os mecanismos de transporte de calor e de humidade passíveis de serem considerados pelo WUFI® sejam contabilizados [41], logo, os resultados obtidos não serão representativos da realidade.

As propriedades básicas incluem: a massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]; a porosidade [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]; calor específico do material no estado seco [J/kg.K]; a condutibilidade térmica do material no estado seco [W/m.K]; e o factor de resistência à difusão de vapor do material no estado seco [-].

As propriedades complementares incluem: a curva de armazenamento de humidade [kg/m<sup>3</sup>]; o coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a sucção [m<sup>2</sup>/s]; o coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a redistribuição [m<sup>2</sup>/s]; a dependência da condutibilidade térmica em relação ao teor de água [W/m.K]; e a dependência do factor de resistência à difusão de vapor em relação ao teor de água [-].

### 3.2.2. Dados climáticos

Os dados climáticos permitem definir as condições dos climas fronteira (i.e. exterior e interior). Os dados climáticos que o programa necessita são os seguintes: chuva incidente [l/m<sup>2</sup>.h]; radiação solar incidente [W/m<sup>2</sup>]; temperatura exterior [°C]; humidade relativa exterior [-]; temperatura interior [°C]; humidade relativa interior [-]; pressão atmosférica [hPa]; radiação atmosférica [W/m<sup>2</sup>].

O programa WUFI® recorre ao ficheiro climático em cada *time step* de modo a contabilizar estes dados nas equações de transporte simultâneo. No caso da chuva incidente e da radiação solar incidente é necessário definir a inclinação e a orientação do elemento construtivo pois são quantidades direccionais.

<sup>29</sup> A pressão de saturação depende apenas da temperatura (vd. Subcapítulo 2.2.2.2).

### 3.2.3. Coeficientes de transporte de superfície

Os coeficientes de transporte de superfície permitem quantificar a relação entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo. Os coeficientes de transporte de superfície que o programa necessita são os seguintes: resistência térmica superficial [ $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ]; espessura da camada de ar de difusão equivalente [m]; coeficiente de absorção de radiação por onda-curta [-]; emissividade de radiação por onda-longa [-]; factor de absorção de chuva incidente [-].

No clima interior os únicos coeficientes de transporte de superfície a ter em conta são a *resistência térmica superficial* e a *espessura da camada de ar de difusão equivalente*.

O *coeficiente de transferência de vapor de água para o gradiente de pressão* é obtido em função da *condutância térmica por convecção*, portanto, o programa efectua o seu cálculo automaticamente.

### 3.2.4. Condições iniciais

É necessário especificar as condições a que o elemento construtivo está sujeito antes da simulação, denominadas condições iniciais, de modo a que o programa possua um ponto de partida para resolver as equações de transporte simultâneo de calor e de humidade. Uma vez que as equações de transporte simultâneo são calculadas a partir da humidade relativa e da temperatura torna-se necessário caracterizar a sua variação ao longo da secção transversal do elemento construtivo.

As condições iniciais de humidade são caracterizadas a partir de: ou um valor constante de humidade ao longo da secção transversal do elemento construtivo; ou um valor constante de humidade para cada camada constituinte do elemento construtivo; ou um perfil de humidade.

As condições iniciais de temperatura são caracterizadas a partir de: ou um valor constante de temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo; ou um perfil de temperatura.

## 3.3. Outputs

O programa de cálculo WUFI® apresenta os resultados obtidos a partir das simulações efectuadas em três formas distintas: o *Status of Last Calculation*; os *Quick Graphs*; e os *Result Graphs*. No entanto, o programa ainda permite visualizar a variação da temperatura, da humidade relativa e do teor de água ao longo do período de simulação através do *Run Calculation with Film*, e trabalhar os resultados obtidos a partir das simulações efectuadas em programas de cálculo auxiliar (e.g. *MS Excel*) através da funcionalidade *ASCII Export*. No presente subcapítulo são descritas as cinco formas de visualização dos resultados obtidos a partir das simulações.

### 3.3.1. Status of Last Calculation

O *Status of Last Calculation* consiste num resumo dos resultados obtidos que permite efectuar uma apreciação inicial sobre a simulação e verificar a qualidade da malha numérica adoptada.

Os pontos que este quadro resumo aborda são os seguintes: o teor de água por camada (i.e. *Water Content: "Name of the material"*) e o teor de água para o elemento construtivo (i.e. *Total Water Content*); o fluxo de calor<sup>30</sup> e o fluxo de humidade<sup>30</sup> (i.e. *Time Integral of fluxes*); o estado da simulação (i.e. *Status of Calculation*); e a verificação da qualidade da malha numérica adoptada (i.e. *Check for numerical quality*).

O valor do fluxo de calor ou do fluxo de humidade pode ser negativo ou positivo. No clima interior um valor negativo implica que o fluxo ocorre no sentido do elemento construtivo e um valor positivo no

---

<sup>30</sup> Os valores apresentados são referentes a todo o período de cálculo adoptado e a ambas as superfícies do elemento construtivo.

sentido do meio ambiente. No clima exterior um valor negativo implica que o fluxo ocorre no sentido do meio ambiente e um valor positivo no sentido do elemento construtivo.

A qualidade de uma malha numérica é verificada pelo número de falhas de convergência, que deve ser nulo ou de valor reduzido, e pela diferença dos valores entre o *Balance 1* e o *Balance 2*, que também deve ser nula ou de valor reduzido.

#### 3.3.1.1. Teor de água

Em relação ao teor de água são apresentados dois tipos de valor: o *teor de água por camada*, número de valores igual ao número de camadas, e o *teor de água do elemento construtivo*. Para ambos os tipos de teor de água o programa apresenta: o valor de teor de água que corresponde ao início e ao fim da simulação; o valor de teor de água mínimo e o valor máximo atingidos ao longo do período de simulação. Estes valores permitem efectuar avaliações iniciais em relação ao comportamento higrotérmico do elemento construtivo simulado (e.g. se ocorre secagem ou acumulação de água no elemento construtivo).

O valor do *teor de água do elemento construtivo* é obtido através do somatório do produto entre o valor de teor de água médio por camada e a respectiva espessura da camada. Por esta razão, enquanto os valores de *teor de água por camada* são apresentados em  $\text{kg/m}^3$ , os valores de *teor de água do elemento construtivo* são apresentados em  $\text{kg/m}^2$ .

#### 3.3.1.2. Fluxos de calor e humidade para o período de cálculo

No *Time Integral of fluxes* são apresentados os seguintes valores: os fluxos de calor referentes a ambas as superfícies do elemento construtivo; a intensidade das fontes de calor adoptadas no interior do elemento construtivo; os fluxos de humidade referentes a ambas as superfícies do elemento construtivo; e a intensidade das fontes de humidade adoptadas no interior do elemento construtivo.

Os valores dos fluxos de calor e das fontes de calor são apresentados em  $\text{MJ/m}^2$ , e os valores dos fluxos de humidade e das fontes de humidade são apresentados em  $\text{kg/m}^2$ .

#### 3.3.1.3. Estado da simulação

No estado da simulação são apresentadas as seguintes informações: a data e a hora a que a simulação foi iniciada; o intervalo de tempo que o WUFI® demorou a efectuar a simulação; o número de falhas de convergência (i.e. *No. of Convergence Failures*); e o número de falhas de absorção de água da chuva (i.e. *No. of Rain Absorption Failures*).

##### 3.3.1.3.1. Número de falhas de convergência

O programa de cálculo WUFI® recorre a um processo iterativo para calcular o transporte simultâneo de calor e de humidade. No entanto, existem casos em que a convergência é de tal forma lenta que o número máximo de iterações é atingido antes da *solução real*<sup>31</sup> [41].

O procedimento do programa é comparar o valor da solução obtido após o fim das iterações com o valor do critério de finalização: caso o valor seja inferior ao critério de finalização o programa aceita o resultado e prossegue com os cálculos; caso o valor seja superior ao critério de finalização o programa aceita o resultado mas aumenta o número de falhas de convergência e prossegue com os cálculos.

O número de falhas de convergência permite aferir a qualidade da simulação efectuada. Contudo, uma vez que este parâmetro não apresenta a diferença entre os valores não é possível averiguar a amplitude

---

<sup>31</sup> O programa admite que a solução obtida é a solução real quando é ultrapassado o critério de finalização.

do erro. Por esta razão pode acontecer que a diferença entre os valores seja mínima, e consequentemente a falha de convergência seja irrelevante.

O desenvolvimento de instabilidade numérica promove um afastamento gradual dos resultados obtidos em relação à solução real, ou seja, resulta numa aproximação de pouca qualidade da solução do transporte simultâneo de calor e de humidade. É possível identificar a ocorrência de instabilidade numérica quando ocorre o aparecimento ou desaparecimento de água no interior do elemento construtivo sem que as condições dos climas fronteira o promovam [41].

De acordo com *Schmidt* [41] um número reduzido de falhas de convergência ao longo do período de cálculo não é preocupante (e.g. para um ano de período de cálculo uma ou duas falhas de convergência). No entanto, um valor bastante superior pode ser indicador de instabilidade numérica (e.g. para um ano de período de cálculo cinquenta falhas de convergência).

#### 3.3.1.3.2. Número de falhas de absorção de água da chuva

O programa de cálculo WUFI® também recorre a um método iterativo para calcular a quantidade de água absorvida pela superfície exterior proveniente da chuva incidente, uma vez que existe a possibilidade da quantidade de água disponível ser menor que a quantidade de água que o elemento construtivo absorve durante o *time step* [41].

O procedimento em relação à absorção de água do programa é o seguinte: em primeiro lugar é efectuado um teste em que se fornece uma quantidade ilimitada de água à superfície do elemento construtivo e é registada a quantidade de água absorvida. Este passo é efectuado em cada *time step*. Em seguida compara-se esse valor com a quantidade de água que corresponde ao ficheiro climático adoptado.

No caso de a quantidade de água que corresponde ao ficheiro climático ser inferior à quantidade de água absorvida para fornecimento ilimitado de água, o factor limitante é o material e o programa efectua os cálculos. Caso contrário, ou seja, quando a quantidade de água que corresponde ao ficheiro climático é superior, o programa efectua *iterações adicionais*<sup>32</sup> até que o valor da quantidade de água absorvida para fornecimento ilimitado de água seja igual ao valor da quantidade de água que corresponde ao ficheiro climático.

Existe a possibilidade da convergência ser de tal maneira lenta que não é possível atingir a *solução real*. Nestes casos o programa termina a iteração e prossegue com os cálculos, apenas aumentando o número de falhas de absorção de água da chuva. De notar que esta ocorrência não influencia significativamente os resultados obtidos nas simulações efectuadas [41].

#### 3.3.1.4. Verificação da qualidade da malha numérica adoptada

Na verificação da qualidade da malha numérica são apresentados os fluxos capilares e os fluxos de difusão de vapor de água, e os balanços de quantidade de água (i.e. *Balance 1* e o *Balance 2*), sendo os valores apresentados em kg/m<sup>2</sup>.

##### 3.3.1.4.1. Fluxo capilar e fluxo de difusão de vapor de água

Os fluxos capilares e os fluxos de difusão de vapor de água são referentes à fronteira entre o primeiro e o segundo elemento da malha numérica (i.e. lado esquerdo do elemento construtivo) e à fronteira entre o penúltimo e o último elemento da malha numérica (i.e. lado direito do elemento construtivo). A opção por estes valores, em detrimento dos fluxos referentes às superfícies do elemento construtivo, prende-se com o facto de a quantidade de água proveniente do meio ambiente poder não ser igual à quantidade de água que o elemento construtivo absorve a partir da sua superfície. Esta situação ocorre quando a

---

<sup>32</sup> As iterações adicionais consistem no ajuste de uma resistência fictícia ao fluxo na superfície do material até que os valores das quantidades de água absorvidas para o fornecimento de água ilimitada e de acordo com o ficheiro climático sejam iguais [41].

capacidade de absorção do material é ultrapassada (e.g. ocorrência de elevada condensação superficial) e a quantidade de água excedentária escorre pela superfície do elemento construtivo, e consequentemente desaparece dos cálculos [41]. Uma vez que os fluxos são referentes às fronteiras de elementos da malha numérica existe a possibilidade do fluxo capilar referente ao clima interior ser diferente de zero. O programa WUFI® possui uma simbologia em relação ao processo de transporte de humidade e em relação ao lado do elemento construtivo (vd. Quadro A.1, no Anexo A).

#### 3.3.1.4.2. Balanços de quantidade de água

O *Balance 1* corresponde à diferença entre os valores de teor de água para o elemento construtivo no início e no fim da simulação, e o *Balance 2* corresponde à soma<sup>33</sup> dos fluxos capilares e dos fluxos de difusão de vapor de água referentes às fronteiras de elementos da malha numérica.

Os valores de ambos os balanços devem ser iguais, pois caso ocorra alteração na quantidade de água no interior de um elemento construtivo, esta resulta do transporte de humidade através das suas superfícies [41]. Contudo, no *Balance 2* não são contabilizados nem o primeiro, nem o último elemento da malha numérica, o que pode originar uma diferença entre os valores dos balanços. No caso de os valores serem distintos é necessário verificar a amplitude da diferença. Se esta for significativa (e.g. -5,7 e +10,8 [26]) é necessário reformular a simulação aplicando uma malha numérica mais refinada. No entanto, se a diferença for reduzida (e.g. 17,5 e 17,7 [26]) não é necessário reformular a simulação.

### 3.3.2. Quick Graphs

Os *Quick Graphs* consistem na variação ao longo do período de cálculo dos seguintes parâmetros: teor de água para o elemento construtivo (i.e. *Total Water Content*), apresentado em kg/m<sup>2</sup>; teor de água médio por camada (i.e. *Water Content in Layer*), apresentado em kg/m<sup>3</sup> e em M.-%; humidade relativa, temperatura e temperatura de ponto de orvalho para os pontos de monitorização, apresentados em % e °C; *Isopleths*, que varia em função da humidade relativa [%] e da temperatura [°C].

Estes gráficos para além de permitirem efectuar uma avaliação inicial da sua variação ao longo da simulação, também permitem verificar se o período de cálculo adoptado é adequado. A avaliação do período de cálculo é efectuada em primeiro lugar verificando se foi atingido o equilíbrio dinâmico no elemento construtivo, e em seguida se o equilíbrio dinâmico foi atingido nas várias camadas que constituem o elemento construtivo. Esta forma de visualização dos resultados não é a mais adequada para comparar os resultados das diferentes simulações.

O gráfico das *Isopleths* permite efectuar uma avaliação inicial em relação à possibilidade de desenvolvimento de colonizações biológicas, ao comparar os pontos representativos das condições higrotérmicas com as *isopleths limite*.

No gráfico são apresentados: os diversos pontos representativos do ponto de monitorização adoptado em relação às condições higrotérmicas (i.e. humidade relativa e a temperatura) para uma data específica; e as *isopleths limite*, LIM B I (i.e. para produtos reutilizáveis e produtos produzidos a partir de materiais facilmente degradáveis [41]) e a LIM B II (i.e. para materiais com uma estrutura porosa [41]).

No caso de o ponto se localizar abaixo da respectiva *isopleths limite* é provável que não ocorra o desenvolvimento de colonizações biológicas. No caso de o valor ser superior à respectiva *isopleths limite* é necessário efectuar uma investigação adicional para averiguar se ocorre ou não o desenvolvimento de colonizações biológicas [41].

---

<sup>33</sup> É calculado da seguinte forma:  $Balance2 = kl + dl - (kr + dr)$

### 3.3.3. Result Graphs

Os *Result Graphs* permitem visualizar a variação de vários parâmetros ao longo do período de cálculo para uma posição específica (i.e. *Courses*) ou ao longo da secção transversal para uma data específica (i.e. *Perfiles*). A vantagem dos *Result Graphs* em relação aos *Quick Graphs* é que para além de apresentarem a variação de um maior número de parâmetros, também permitem a sua edição. Contudo, esta forma de visualização dos resultados possui a mesma desvantagem que os *Quick Graphs*, ou seja, é difícil comparar os resultados de diferentes simulações.

A listagem dos parâmetros que variam ao longo do período de cálculo disponíveis nos *Result Graphs* (i.e. *Courses*) é apresentada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Listagem dos parâmetros que variam ao longo do período de cálculo disponíveis nos *Result Graphs*

Parâmetro	Unidade	Localização
Chuva incidente	[l/m <sup>2</sup> .h]	Referente à superfície do elemento construtivo correspondente ao clima exterior
Radiação solar	[W/m <sup>2</sup> ]	
<i>Radiação solar directa</i> <sup>34</sup>	[W/m <sup>2</sup> ]	
<i>Radiação solar difusa</i> <sup>35</sup>	[W/m <sup>2</sup> ]	
<i>Radiação solar reflectida</i> <sup>36</sup>	[W/m <sup>2</sup> ]	
Temperatura	[°C]	Referente ao clima exterior, ao clima interior, e aos <i>pontos de monitorização adoptados</i> <sup>37</sup>
Humidade relativa	[%]	
Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]	Referente às superfícies do elemento construtivos e às interfaces entre as camadas que constituem o elemento construtivo
Fluxo de humidade	[kg/m <sup>2</sup> .s]	
Fluxo de difusão	[kg/m <sup>2</sup> .s]	
Fluxo capilar	[kg/m <sup>2</sup> .s]	
Fontes de calor	[W/m <sup>2</sup> ]	Referente à zona adoptada pelo utilizador
Fontes de humidade	[kg/m <sup>2</sup> .s]	
Teor de água - volume	[kg/m <sup>3</sup> ]	Valor médio referente a cada camada que constitui o elemento construtivo
Teor de água - área	[kg/m <sup>2</sup> ]	Valor médio referente ao elemento construtivo
Pressão atmosférica	[hPa]	Referente ao clima exterior
Pressão parcial de vapor de água	[hPa]	Referente aos <i>pontos de monitorização adoptados</i> <sup>37</sup>
Coefficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão	[kg/m <sup>2</sup> .s.Pa]	Referente ao clima exterior e ao clima interior
Condutância térmica	[W/m <sup>2</sup> .K]	

<sup>34</sup> Componente da radiação solar que incide directamente na superfície do elemento construtivo.

<sup>35</sup> Componente da radiação solar que é dispersa devido à influência da atmosfera e das nuvens, e incide na superfície do elemento construtivo.

<sup>36</sup> Componente da radiação solar que é reflectida pelo solo e incide na superfície do elemento construtivo.

<sup>37</sup> Neste caso considera-se que as superfícies do elemento construtivo pertencem aos pontos de monitorização adoptados.

Os valores apresentados referentes à chuva incidente e à radiação solar<sup>38</sup> contabilizam a respectiva dependência em relação à orientação e à inclinação do elemento construtivo, porém, os valores ainda não foram multiplicadas pelos respectivos factores de absorção. As fontes de calor e de humidade apenas apresentam variação caso se opte por as introduzir no elemento construtivo (vd. Subcapítulo 4.2.1.4). No caso de se optar por considerar a dependência em relação ao vento (vd. Subcapítulo 4.2.3.1) tanto o *coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão*, como a *condutância térmica* apresentam variação ao longo do período de cálculo para o clima exterior.

Os parâmetros que variam ao longo do elemento construtivo disponíveis nos *Result Graphs* (i.e. *Perfiles*) são os seguintes: a temperatura [°C]; a humidade relativa [%]; e o teor de água [kg/m<sup>3</sup>]. De notar que os gráficos são referentes às datas adoptadas no controlo numérico, mais concretamente no período de cálculo e perfis (vd. Subcapítulo 4.3.1).

### 3.3.4. ASCII Export

O programa de cálculo WUFI® permite que se exportem os resultados dos mesmos parâmetros que são visualizados nos *Result Graphs* (vd. Subcapítulo 3.3.3). Esta funcionalidade possibilita o tratamento dos resultados em programas de cálculo auxiliar (e.g. *MS Excel*), o que constitui uma enorme vantagem pois viabiliza a comparação entre simulações distintas, algo que é dificilmente exequível nos *Quick Graphs* ou mesmo nos *Result Graphs*.

Os ficheiros tipo *ASCII* são construídos através de tabelas compostas por colunas e linhas. O número de colunas é igual ao número de parâmetros a analisar mais um, que corresponde ou à coluna das horas nos *Courses*, ou ao desenvolvimento ao longo da secção transversal nos *Profiles*. O número de linhas é igual ao número de *time step* que compõem o período de cálculo adoptado mais um, que corresponde à linha das condições iniciais.

Tomando como exemplo a análise da variação da humidade relativa para uma superfície exterior do elemento construtivo durante o ano de 2015 com *time step* de uma hora o programa gera um ficheiro do tipo *ASCII* composto por duas colunas e 8761 linhas: a primeira coluna corresponde às horas e a segunda aos valores da humidade relativa; a primeira linha corresponde às condições iniciais adoptadas e as restantes 8760 linhas correspondem ao número de horas que 365 dias possuem e respectivos valores de humidade relativa.

É importante referir que o programa de cálculo não assume anos bissextos, portanto, todos os anos que compõem o período de cálculo possuem 365 dias. Este facto pode originar alguma confusão caso não seja tido em conta aquando do tratamento da informação obtida através do *ASCII Export*.

O procedimento sugerido para poder trabalhar os resultados obtidos através do programa WUFI® no programa de cálculo auxiliar *MS Excel*<sup>39</sup> é o seguinte: I) Escolher dos resultados obtidos os que têm interesse analisar e criar um ficheiro do tipo *ASCII*; II) Abrir o ficheiro com o programa de cálculo auxiliar<sup>40</sup>; III) Escolher o tipo de ficheiro *Delimited*; IV) Escolher o delimitador *Space*; V) Escolher o separador decimal *Period*.

No entanto, quando se exportam os resultados obtidos a partir de simulações em ficheiros do tipo *ASCII* os valores dos fluxos de calor e de humidade são apresentados em W/m<sup>2</sup> e kg/m<sup>2</sup>.s, respectivamente. Existe a possibilidade de recriar os resultados obtidos no *Status of Last Calculation* com os resultados exportados. Em relação aos fluxos de humidade basta somar todos os resultados e multiplicar pelo número de segundos ao longo de uma hora (i.e. 3600 segundos). No caso do fluxo de calor para além deste passo é ainda necessário dividir por 10<sup>6</sup> de modo a obter o resultado em mega joules.

---

<sup>38</sup> A radiação solar incidente na superfície exterior do elemento construtivo é composta pela radiação solar directa, a radiação solar difusa e a radiação solar reflectida, portanto, também dependem da orientação e inclinação do elemento construtivo, e ainda não foi multiplicada pelo *factor de absorção de radiação por onda-curta*.

<sup>39</sup> A versão utilizada na presente dissertação foi Microsoft Excel 2013 - *English Version*, logo, os termos encontram-se em inglês.

<sup>40</sup> É necessário seleccionar a opção visualizar todos os tipos de ficheiros (i.e. *All Files*)



Ao exportar *Profiles* de temperatura e de teor de água em ficheiros do tipo *ASCII* é possível utilizar esses resultados como condições iniciais para uma simulação (vd. Subcapítulo 4.2.4.3), permitindo assim a segmentação de uma simulação longa ou mesmo simular o envelhecimento de um elemento construtivo.

### 3.3.5. Run Calculation with Film

Em relação à forma como os cálculos das simulações são efectuados o programa disponibiliza as seguintes opções: realizar apenas uma simulação (i.e. *Run Calculation*); realizar consecutivamente as simulações que correspondem aos vários casos que compõem um projecto (i.e. *Run all Calculation*); e realizar a simulação associada a uma animação em que é possível visualizar o transporte de calor e de humidade à medida que os cálculos são efectuados (i.e. *Run Calculation with Film*). A vantagem desta última funcionalidade é que permite visualizar a interacção entre os climas fronteira e o elemento construtivo, e a consequente variação do estado higrotérmico desse elemento.

A animação é composta por duas representações gráficas da secção transversal do elemento construtivo. Na representação superior é apresentada a variação da temperatura, e na representação inferior a variação da humidade relativa<sup>41</sup> e do teor de água ao longo do período de cálculo adoptado. As *condições dos climas fronteiras*<sup>42</sup> são indicadas nas representações gráficas através de setas nas superfícies do elemento construtivo com a cor<sup>43</sup> de acordo com a condição higrotérmica analisada. No caso do lado esquerdo do elemento construtivo representar um clima exterior é apresentada a variação da intensidade da radiação solar e da chuva incidente sob a superfície do elemento construtivo ao longo do período de cálculo.

Acima das duas representações gráficas apresenta-se a variação do fluxo de calor e do fluxo de humidade nas superfícies e nas interfaces entre as camadas do elemento construtivo, através de setas com a cor de acordo com a condição higrotérmica analisada. O fluxo de calor inclui a radiação solar no caso do clima exterior, e o fluxo de humidade é a soma do fluxo de difusão e do fluxo capilar [41]. Em ambos os tipos de fluxo a sua intensidade é directamente proporcional à dimensão da seta.

## 3.4. Limitações do programa

A versão<sup>44</sup> do WUFI® utilizada na presente dissertação calcula o transporte simultâneo de calor e de humidade unidimensional. No entanto, para que fosse possível simular os processos higrotérmicos complexos inerentes a esta temática foi necessário admitir as seguintes limitações [41]:

- A impossibilidade de simular fenómenos bidimensionais (e.g. pontes térmicas planas, humidade ascensional);
- Nos cálculos efectuados pelo programa WUFI® não são considerados os seguintes processos higrotérmicos: a convecção no transporte de calor e no transporte de vapor de água; a humidade ascensional devido à gravidade, o fluxo hidráulico devido a diferenças de pressão, a *electrokinetic*, e a osmose no transporte de humidade na fase líquida;
- A dependência entre os sais e o transporte de humidade na fase líquida não é considerada;
- A resistência inerente a uma zona de interface entre dois materiais porosos não é considerada;
- Em materiais com uma *hysteresis* bastante significativa a simplificação de se considerar uma curva média pode não ser indicada;

---

<sup>41</sup> Existe a possibilidade de apresentar a variação da humidade relativa, ou a variação da pressão parcial de vapor de água ao longo do período de cálculo.

<sup>42</sup> Entende-se como condições dos climas fronteira a temperatura, a humidade relativa e a pressão parcial de vapor de água.

<sup>43</sup> A temperatura está associada à cor vermelha, o teor de água à cor azul e a pressão de vapor de água à cor verde por padrão. De acordo com as predefinições do programa WUFI®.

<sup>44</sup> A versão Pro 4.2 IBP.

- O fluxo de entalpia que resulta do transporte de humidade na fase líquida causado por um diferencial de temperatura é ignorado (e.g. água de chuva a temperatura baixa não arrefece a superfície do elemento construtivo);
- O valor da *condutância térmica superficial* ser constante ou depender de uma forma simples das características do vento.

É ainda possível afirmar que o programa WUFI® tem a limitação de não considerar o efeito do sombreamento e a influência da inércia térmica nos cálculos efectuados de acordo com *Jorne* [24].

### 3.5. Regras gerais para uma boa solução construtiva

Em seguida são apresentados alguns critérios gerais que os elementos construtivos a simular devem garantir, de modo a que tenham um comportamento higrotérmico adequado [41]:

- A quantidade de humidade num elemento construtivo não se deve acumular ao longo do tempo, logo, o elemento deve conseguir secar;
- Os materiais utilizados na construção civil em contacto com humidade não devem sofrer danos (e.g. devido à corrosão ou à proliferação de colonizações biológicas);

A *German Standard* DIN 4108-3 [10] fornece critérios suplementares de modo a que os elementos construtivos tenham um comportamento higrotérmico adequado [41]:

- A quantidade de humidade derivada de condensação em tectos ou paredes não deve exceder o  $1,0 \text{ kg/m}^2$ ;
- Em zonas de interface entre materiais hidrófobos, não é permitido um aumento acima dos  $0,5 \text{ kg/m}^2$ ;
- O aumento de humidade na madeira não deve ser superior a 5 mass-%, e em materiais com madeira processada na sua constituição não deve exceder os 3 mass-%;

## 4. DADOS REQUERIDOS PELO PROGRAMA WUFI®

No presente capítulo são apresentadas as informações necessárias para que o programa possa efectuar os cálculos de transporte simultâneo de calor e de humidade. Em primeiro lugar são descritas as propriedades básicas e as propriedades complementares dos materiais que compõem o elemento construtivo. Em segundo lugar são descritas as especificações dos elementos construtivos a simular. Em terceiro lugar é descrito o controlo numérico das simulações. Em último lugar são descritas as formas de simulação do clima exterior e do clima interior.

### 4.1. Propriedades dos materiais necessários para efectuar os cálculos

De modo a que seja possível o programa de cálculo WUFI® efectuar os cálculos de transporte simultâneo de calor e de humidade são necessários dados relativos aos materiais que compõem o elemento construtivo a simular. Os dados são divididos em duas categorias: propriedades básicas; e propriedades complementares. É possível o programa apenas recorrer às propriedades básicas dos materiais, contudo tal não é aconselhável pois implica que não serão considerados todos os processos de transporte de calor e de humidade passíveis de serem contabilizados pelo programa [41].

#### 4.1.1. Propriedades básicas dos materiais

As propriedades básicas dos materiais são as seguintes: massa volúmica [ $\rho_{bulk}$ , kg/m<sup>3</sup>]; porosidade [ $\psi$ , m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]; calor específico do material no estado seco [ $c$ , J/kg.K]; condutibilidade térmica do material no estado seco [ $\lambda_0$ , W/m.K]; e factor de resistência à difusão de vapor do material no estado seco [ $\mu$ , -].

##### 4.1.1.1. Massa volúmica

A *massa volúmica* de um material é o quociente entre a massa da amostra e o volume total da amostra, sendo os valores apresentados em kg/m<sup>3</sup>. Esta característica é utilizada pelo programa para transformar o *calor específico mássico* [J/kg.K] em *calor específico volúmico* [J/m<sup>3</sup>.K] [41]. Esta transformação é efectuada através do produto do *calor específico mássico* pela *massa volúmica* do material e é tida em conta na equação de transporte de calor, mais concretamente nas equações de cálculo da entalpia (vd. Subcapítulo 3.1.1). Em seguida é apresentada a equação da *massa volúmica* de um material:

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{total}} \quad 4.1$$

Onde,

$\rho_{bulk}$  Massa volúmica do material [kg/m<sup>3</sup>];  
 $m$  Massa da amostra [kg];  
 $V_{Total}$  Volume da amostra [m<sup>3</sup>].

Na eventualidade de se pretender introduzir um novo material na biblioteca do WUFI® a *massa volúmica* é uma propriedade facilmente caracterizada que se encontra disponível para um grande número de materiais em várias referências bibliográficas (e.g. norma EN 12524:2000 [13]). No caso de não existir bibliografia que caracterize o material em questão, a *massa volúmica* pode ser calculada experimentalmente.

A *massa volúmica aparente* de um material é o quociente entre a massa do material seco e o seu volume aparente (i.e. volume apenas da estrutura sólida do material), sendo os valores apresentados em kg/m<sup>3</sup>. Em seguida é apresentada a equação da *massa volúmica aparente* de um material:

$$\rho_{true} = \frac{m}{(V_{Total} - V_{poros})} \quad 4.2$$

Onde,

$\rho_{true}$  Massa volúmica aparente [kg/m<sup>3</sup>];  
 $m$  Massa da amostra [kg];  
 $V_{Total}$  Volume da amostra [m<sup>3</sup>];  
 $V_{poros}$  Volume ocupado pelos poros [m<sup>3</sup>].

#### 4.1.1.2. Porosidade

A *porosidade* de um material expressa a proporção do volume de vazios dos poros em relação ao volume total da amostra, os valores são apresentados em m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> ou em percentagem. Esta característica permite estimar o valor de *teor de água máximo* ao ser multiplicada pela *massa volúmica da água*<sup>45</sup> [41]. Uma vez que na maioria das simulações o teor de água não atinge valores superiores ao *teor de água de saturação* (i.e. limite inferior ao *teor de água máximo*), torna-se plausível apenas estimar o valor do *teor de água máximo*. Em seguida é apresentada a equação de *porosidade* de um material:

$$\psi = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{true}} \quad 4.3$$

Onde,

$\psi$  Porosidade [m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>];  
 $\rho_{true}$  Massa volúmica aparente [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\rho_{bulk}$  Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>].

Relativamente à sua porosidade os materiais classificam-se em: *porosidade aberta*, existe comunicação entre os vazios, o que possibilita a circulação de fluídos (e.g. ar, humidade) no interior do material; e *porosidade fechada*, não existe ligação entre os vazios, portanto não existe circulação de fluidos no interior de materiais (i.e. materiais impermeáveis). A maioria dos materiais utilizados na construção possuem *porosidade aberta* [17].

#### 4.1.1.3. Calor específico

O *calor específico mássico* consiste na quantidade de energia que é necessário fornecer a um quilograma do material para que a sua temperatura aumente em um Kelvin, sendo os valores apresentados em J/kg.K. Este valor é referente ao material no estado seco.

A partir dos conceitos de *calor específico mássico* e de *massa volúmica* é possível obter o *calor específico volúmico* (vd. Subcapítulo 4.1.1.1) que consiste na quantidade de energia que é necessário fornecer a um metro cúbico para aumentar a temperatura em um Kelvin, sendo os valores apresentados em J/m<sup>3</sup>.K.

A vantagem em utilizar *calor específico mássico* deve-se ao facto de este conceito depender da composição química do material e não da sua porosidade [41]. Como o valor de *calor específico mássico* é referente ao material no estado seco, o programa permite contabilizar as alterações de entalpia causadas pela existência de humidade nos seus vários estados físicos (vd. Subcapítulo 3.1).

<sup>45</sup> No programa WUFI® assume-se que a massa volúmica da água é 1000 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.1.1.4. Condutibilidade térmica

Define-se *condutibilidade térmica* como a quantidade de energia, sob a forma de calor, que atravessa uma espessura unitária para um diferencial de temperatura unitário, sendo os valores apresentados em W/m.K.

No programa de cálculo WUFI®, o valor de *condutibilidade térmica* dos materiais é referente ao material no seu estado seco, ou seja, a *condutibilidade térmica do material seco*. O programa contabiliza ainda a influência do teor de água sobre a *condutibilidade térmica*, uma vez que este valor é directamente dependente da quantidade de humidade no interior de um material (vd. Subcapítulo 4.1.2.3).

Na eventualidade de se pretender introduzir um novo material na biblioteca do WUFI® a *condutibilidade térmica* pode ser consultada na abundante bibliografia existente sobre o tema (e.g. ITE 50 [38]) ou calculada experimentalmente seguindo as respectivas normas.

Quando se opta por introduzir um novo material na biblioteca deve-se ter em atenção certos aspectos dependendo da origem do valor de *condutibilidade térmica*. Quando este valor é obtido experimentalmente deve-se ter em atenção que a contribuição do *calor latente de evaporação* deve ser subtraída da quantidade de energia total, uma vez que esta já é contabilizada noutro termo da equação de transporte de calor (vd. Subcapítulo 3.1.1). No caso de o valor ser consultado deve-se ter a certeza que este é referente à *condutibilidade térmica do material seco*, uma vez que a dependência do teor de água necessita que o valor inicial seja o referente ao material seco (vd. Subcapítulo 4.1.2.3).

#### 4.1.1.5. Factor de resistência à difusão de vapor

A difusão de vapor de água num meio poroso depara-se com uma resistência distinta daquela que se depara no meio ambiente. Esta distinção resulta das características do material (vd. Subcapítulo 2.2.2.1) e o parâmetro que a contabiliza é o *factor de resistência à difusão de vapor*. Este factor demonstra o quanto a resistência à difusão no meio poroso é superior à do meio ambiente, sendo os valores adimensionais e referentes ao material no seu estado seco.

### 4.1.2. Propriedades complementares

As propriedades complementares dos materiais são as seguintes: curva de armazenamento de humidade; coeficientes de transporte de humidade na fase líquida (para a sucção e para a redistribuição); a dependência da condutibilidade térmica em relação ao teor de água; e a dependência do factor de resistência à difusão de vapor em relação ao teor de água.

#### 4.1.2.1. Curva de armazenamento de humidade

O teor de água é um parâmetro de identificação do estado higrotérmico de um material importante, pois permite identificar a quantidade de humidade existente no seu interior, tornando-se assim imperativo determinar este valor. A quantidade de humidade no interior de um material é caracterizada através da *curva de armazenamento de humidade*, sendo apenas necessário recorrer a uma curva de elevada precisão quando existe uma ligação capilar<sup>46</sup> entre as camadas do elemento construtivo (e.g. interface entre a camada reboco e a camada de alvenaria) [31]. Nos casos em que não se verifica esta ligação é possível efectuar apenas uma aproximação da *curva de armazenamento de humidade* (e.g. aquando da utilização de uma barreira pára-vapor) [31].

A *curva de armazenamento de humidade* é obtida a partir das *sorption isotherms* no domínio higroscópico e do método do *pressure plate* no domínio capilar. Existe uma bibliografia extensa sobre *sorption isotherms* para inúmeros materiais utilizados na construção civil. No entanto, existe a possibilidade de construir a *curva de armazenamento de humidade* curva para qualquer material. O valor

---

<sup>46</sup> Caso não seja impedido o transporte de humidade entre as camadas do elemento construtivo.

de teor de água para uma humidade relativa de 80%, denominado *teor de água referência*, é a base para determinar a curva de armazenamento.

No programa de cálculo WUFI® a curva de armazenamento é descrita através de uma tabela onde são apresentados os valores da humidade relativa e respectivos valores do teor de água. Em caso de necessidade o programa efectua interpolações lineares entre os valores existentes [41].

De uma forma geral a *histerese*<sup>47</sup> entre a curva de adsorção e a curva de desadsorção<sup>48</sup> não é significativa [41], logo; pode ser apenas utilizada a curva de adsorção isotérmica no domínio higroscópico. Contudo, caso a *histerese* seja pronunciada é possível utilizar uma curva que corresponde à média entre a curva de adsorção e a curva de desadsorção [31]. No método do *pressure plate* as medições são referentes a valores da curva de desadsorção devido ao seu procedimento [28].

No domínio de super-saturação não existe uma relação entre a humidade relativa e o teor de água, uma vez que a humidade relativa possui sempre o valor unitário e o teor de água varia entre o valor de *teor de água de saturação* e de *teor de água máximo* [41]. Para que seja possível recorrer à equação de transporte de humidade<sup>49</sup> é necessário acrescentar uma entrada na tabela de humidade relativa (i.e. o valor de 1,01 de humidade relativa) que corresponde ao *teor de água máximo*, tornando possível atribuir um único valor de humidade relativa a cada valor de teor de água. O teor de água no domínio de super-saturação não depende da humidade relativa e é determinado a partir das condições de fronteira, aumentando quando ocorre condensação e diminuindo quando ocorre evaporação [41].

#### 4.1.2.1.1. Aproximação da curva de armazenamento de humidade

O programa WUFI® recorre à aproximação da *curva de armazenamento de humidade* caso não exista a variação do teor de água em função da humidade relativa para o material em análise na biblioteca do programa. Uma aproximação da curva de armazenamento de humidade é efectuada recorrendo ao valor de *teor de água de saturação* e ao valor de *teor de água referência*. Ambos os valores são conhecidos para um elevado número de materiais utilizados na construção civil e caso não sejam podem ser determinados experimentalmente.

A aproximação da curva de armazenamento de humidade para materiais higroscópicos é efectuada recorrendo à seguinte equação [41]:

$$w = w_{sat} \times \frac{(d - 1) \times \varphi}{(d - \varphi)} \quad 4.4$$

Onde,

$w$	Teor de água de equilíbrio [kg/m <sup>3</sup> ];
$w_{sat}$	Teor de água de saturação [kg/m <sup>3</sup> ];
$d$	Factor de aproximação [-];
$\varphi$	Humidade relativa [-].

O *factor de aproximação* é determinado reorganizando a equação 4.4 de forma a obter este factor a partir do *teor de água de saturação* e do *teor de água referência* para material em análise. É importante lembrar que o *teor de água referência* corresponde a uma humidade relativa de 80 %.

<sup>47</sup> Diferença entre o desenvolvimento do processo de adsorção e o processo de desadsorção, uma vez que devido a determinadas características dos materiais (e.g. configuração dos poros) podem ocorrer a velocidades distintas [19].

<sup>48</sup> Processo inverso à adsorção que ocorre quando, devido às condições dos climas fronteira, a humidade relativa diminui e consequentemente o valor de teor de água também diminui.

<sup>49</sup> De forma a ser possível efectuar os cálculos recorrendo às equações de transporte de humidade é necessário que a cada valor de humidade relativa corresponda um único valor de teor de água [41].

#### 4.1.2.1.2. Curva de armazenamento de humidade padrão

O programa WUFI® necessita que seja definida uma *curva de armazenamento de humidade* para qualquer material de modo a ser possível efectuar os cálculos de transporte simultâneo de calor e de humidade (vd. Subcapítulo 3.1.3). Deste modo, o programa associa uma *curva de armazenamento de humidade fictícia* aos materiais sem quantidade de humidade significativa (e.g. materiais não higroscópicos, em que no domínio higroscópico e no domínio capilar o teor de água é aproximadamente zero, e no domínio de super-saturação varia entre zero e o *teor de água máximo* [41]), ou aos materiais em que o utilizador não tenha definido uma *curva de armazenamento de humidade*.

No caso do material em análise não ter associado uma *curva de armazenamento de humidade* o programa de cálculo recorre à seguinte equação:

$$w(\varphi) = \frac{a}{b - \varphi} + c \quad 4.5$$

Onde,

$w(\varphi)$  Teor de água [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\varphi$  Humidade relativa [-].

O material nestas condições tem um valor de *teor de água de saturação artificial* que corresponde aproximadamente a 5 % do valor do *teor de água máximo* (vd. Anexo F.1, no Anexo F).

Os resultados obtidos a partir das simulações efectuadas no WUFI® vão apresentar uma *curva de armazenamento de humidade* mesmo para os materiais em que esta não foi definida. Neste tipo de materiais os resultados de teor de água obtidos inferiores ao valor de *teor de água de saturação* (i.e. 5% do valor de *teor de água máximo*) são artificiais devendo ser desprezados. Apenas para valores superiores a este limite (i.e. no domínio de super-saturação) é que os resultados obtidos podem ser considerados reais e consequentemente debatidos. O teor de água no domínio de super-saturação deve-se ao processo de condensação que ocorre no interior do material [41].

#### 4.1.2.2. Coeficientes de transporte de água líquida

No domínio higroscópico o *coeficiente de condução de humidade na fase líquida* é obtido recorrendo à seguinte equação:

$$D_{\varphi} = P_{v,sat} \cdot \delta \cdot \left( \frac{1}{\mu^*(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad 4.6$$

Onde,

$D_{\varphi}$  Coeficiente de condução de humidade na fase líquida [kg/m.s];  
 $P_{v,sat}$  Pressão de saturação de vapor de água [Pa];  
 $\delta$  Permeabilidade ao vapor de água do ar [kg/m.s.Pa];  
 $\mu^*$  Factor de resistência à difusão de vapor fictício [-];  
 $\mu$  Factor de resistência à difusão de vapor [-].

O *factor de resistência à difusão de vapor* é medido para o material em estado seco (i.e. de 3 a 50% de humidade relativa) e o *factor de resistência à difusão de vapor fictício* é medido para valores de humidade relativa elevados (i.e. de 50 a 93 % de humidade relativa).

No domínio capilar o *coeficiente de condução de humidade na fase líquida* é obtido através da *curva de armazenamento de humidade* e do *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida*. Para além da enorme dificuldade em determinar o *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida* este valor varia consoante a quantidade de água no interior do material. Por estas razões o WUFI® recorre a um método simplificado para o determinar baseando-se no coeficiente de absorção de água do material (i.e. *coeficiente de capilaridade*), no teor de água actual e no *teor de água de saturação* do material.

O *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida* não é só um coeficiente característico do material, também depende das condições dos climas fronteira. O WUFI® recorre a dois *coeficientes de transporte de humidade na fase líquida* consoante as condições dos climas de fronteira, ou seja, se incide ou não chuva sob a superfície do elemento construtivo.

O programa recorre ao *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a sucção* quando o material é sujeito a um abastecimento interrompido de água e consequentemente a superfície encontra-se completamente molhada. Este coeficiente está associado à chuva. Quando o material não é sujeito a um abastecimento interrompido de água ocorre uma redistribuição da humidade no interior do material e o programa recorre ao *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a redistribuição*.

Enquanto a sucção é dominada pelos poros de maior dimensão, pois possuem menor resistência ao fluxo, a redistribuição é dominada pelos poros de menor dimensão. Na redistribuição não existe um abastecimento contínuo de água, o que implica a diminuição da quantidade de humidade no interior do material o que consequentemente promove a sua redistribuição. A redistribuição ocorre no sentido dos poros de menor dimensão, já que o valor da pressão capilar é inverso ao tamanho do poro, quer isto dizer que os poros de menor dimensão extraem a água contida nos poros de maior dimensão.

Uma vez que a redistribuição está associada aos poros de menor dimensão (i.e. maior resistência ao fluxo) e a sucção aos poros de maior dimensão (i.e. menor resistência ao fluxo) os dois processos ocorrem a velocidades distintas. O coeficiente associado à redistribuição é de forma geral menor que o coeficiente associado à sucção [41].

Os *coeficientes de transporte de humidade em fase líquida* não foram medidos para um número significativo de materiais utilizados na construção civil [41]. Por esta razão o WUFI® estima o *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a sucção* recorrendo à seguinte equação:

$$D_{ws} = 3,8 \cdot \left( \frac{A}{w_{sat}} \right)^2 \cdot 1000 \left( \frac{w}{w_{sat}} \right)^{-1} \quad 4.7$$

Onde,

$D_{ws}$  Coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a sucção [m<sup>2</sup>/s];  
 $A$  Coeficiente de absorção de água [kg/m<sup>2</sup>.√s];  
 $w_{sat}$  Teor de água de saturação [kg/m<sup>3</sup>];  
 $w$  Teor de água [kg/m<sup>3</sup>].

O *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a sucção* aumenta com o teor de água. A equação 4.7 não é válida no domínio supersaturado, já que não existe uma relação entre o teor de água e o transporte de humidade na fase líquida.

Em relação ao *coeficiente de transporte de humidade na fase líquida para a redistribuição* ainda não existe um método para a sua determinação [31]. O WUFI® calcula de forma distinta o coeficiente para a redistribuição, consoante seja o domínio higroscópico ou o capilar. No domínio higroscópico recorre à equação 2.17 e à equação 4.6 de forma a obter o coeficiente para a redistribuição. No domínio capilar o coeficiente para a redistribuição é igual a um décimo do valor do coeficiente para a sucção [31].

#### 4.1.2.3. Dependência da condutibilidade térmica em relação ao teor de água

Num material poroso ocorre armazenamento de fluídos no interior dos poros, mas a quantidade de humidade influencia o valor de *condutibilidade térmica*. Este facto é facilmente perceptível se consideramos que ao aumento da quantidade de humidade no interior do material está associado uma substituição do fluído existente no interior dos poros, ou seja, substituição do ar ( $\lambda_{ar} = 0,025$  W/m.K) por humidade (e.g.  $\lambda_{água} = 0,6$  W/m.K a 10 °C) o que implica um aumento do valor da *condutibilidade térmica* do material.

A quantidade de energia num material é igual à soma do fluxo de calor que o atravessa com a quantidade de calor gerado através do processo de condensação, ou gasto no processo de evaporação. Contudo, o



fluxo de calor e o calor gerado ou gasto possuem diferentes gradientes de transporte, o que implica serem descritos por diferentes equações (vd. Subcapítulo 3.1.1), sendo necessário diferenciar as respectivas contribuições.

A *condutibilidade térmica* em função do teor de água é calculada através de uma equação linear que tem como valor inicial a *condutibilidade térmica do material seco*. Os valores da *condutibilidade térmica* em função do teor de água são obtidos através da seguinte equação:

$$\lambda = \lambda_0 \times \left( 1 + \frac{b \times w}{\rho_{bulk}} \right) \quad 4.8$$

Onde,

$\lambda$  *Condutibilidade térmica* do material [W/m.K];  
 $\lambda_0$  *Condutibilidade térmica* do material seco [W/m.K];  
 $b$  Suplemento de *condutibilidade térmica* [%/M.-%];  
 $w$  Teor de água [Kg/m<sup>3</sup>];  
 $\rho_{bulk}$  Massa volúmica do material seco [Kg/m<sup>3</sup>].

O *suplemento de condutibilidade térmica* é um coeficiente que permite contabilizar o aumento percentual da *condutibilidade térmica* em função do aumento percentual da massa de humidade. Este valor é característico de cada material e depende das suas características, designadamente da *massa volúmica*. Contudo, em materiais higroscópicos este valor é independente da *massa volúmica* [31].

#### 4.1.2.4. Dependência do factor de resistência à difusão de vapor em relação ao teor de água

Nas medições experimentais não são separados os valores referentes à difusão de vapor de água e os referentes à difusão de superfície, o que implica a redução da resistência à difusão e, consequentemente, do *factor de resistência à difusão de vapor*. Esta redução, que ocorre para valores elevados de humidade relativa, implica a dependência deste factor em relação ao teor de água existente [41].

O programa de cálculo WUFI® contabiliza a dependência do *factor de resistência à difusão de vapor* em relação ao teor de água através dos seguintes métodos [41]: ou considera a constância deste factor em relação à humidade relativa (i.e. teor de água) e ajusta os *coeficientes de transporte de água líquida* (vd. Subcapítulo 4.1.2.2) de modo a contabilizar a difusão de superfície; ou utiliza um *factor de resistência à difusão de vapor* dependente do teor de água.

Em ambos os métodos enunciados anteriormente para valores de teor de água superiores ao *teor de água de saturação* o valor do *factor de resistência à difusão de vapor* diminui com o aumento do teor de água até ser atingido o valor nulo, que corresponde ao *teor de água máximo* [41]. Esta diminuição, para valores elevados de teor de água, mostra a dificuldade da ocorrência de difusão de vapor neste patamar, uma vez que até os poros de maior dimensão se encontram preenchidos por humidade na forma líquida.

## 4.2. Elemento construtivo

O presente subcapítulo descreve a informação necessária para efectuar simulações, nomeadamente: a composição do elemento construtivo e a posição dos pontos de monitorização; a orientação e a inclinação da superfície do elemento construtivo, e a altura do edifício; os coeficientes de transporte de calor e de humidade referentes a cada clima; e por último as condições iniciais do elemento construtivo.

### 4.2.1. Composição do elemento construtivo e posição dos pontos de monitorização

Neste campo do programa de cálculo WUFI® é permitido: construir o elemento construtivo; escolher a localização dos pontos de monitorização; introduzir as fontes ou dissipadores de calor, de humidade e de ventilação no elemento construtivo; e escolher a malha numérica. Para além de apresentar o resultado

das escolhas enunciadas anteriormente o programa apresenta ainda o valor da espessura, da *resistência térmica*<sup>50</sup> e do *coeficiente de transmissão térmica*<sup>51</sup> do elemento construtivo.

As opções enunciadas anteriormente podem ser introduzidas recorrendo à interface gráfica (i.e. *Edit Assembly by: Graph*) ou através da tabela numérica (i.e. *Edit Assembly by: Table*). A tabela numérica para além de possibilitar a construção do elemento construtivo permite a construção da malha numérica pretendida (i.e. *Table: Subdivision – Grid*) e a escolha da localização dos pontos de monitorização (i.e. *Table: Subdivision – Monitor Positions*).

Em relação aos materiais utilizados nos elementos construtivos existem duas possibilidades: utilizar os materiais existentes na biblioteca do programa; ou adicionar um material à biblioteca.

De uma forma geral o clima exterior corresponde ao lado esquerdo do elemento construtivo, e o clima interior ao lado direito do elemento construtivo. Existe ainda a hipótese de trocar os climas ou mesmo considerar apenas um tipo de clima em ambos os lados do elemento construtivo (e.g. parede interior em que ambos os lados correspondem a um clima interior). Contudo, devido às limitações da versão 4.2 IBP – Pro do programa WUFI® é necessário que o clima exterior corresponda ao lado esquerdo do elemento construtivo de modo a contabilizar a chuva incidente e a radiação solar.

#### 4.2.1.1. Elemento construtivo

Neste campo do programa WUFI® o utilizador constrói o elemento construtivo ao optar pela sequência, espessura e composição das suas camadas constituintes. A construção do elemento pode ser efectuada recorrendo à interface gráfica ou através da tabela numérica, sendo o procedimento sugerido idêntico para ambas as metodologias de construção do elemento.

O programa disponibiliza uma biblioteca de materiais que permite montar a solução construtiva pretendida. O procedimento sugerido é o seguinte: I) Recorrer à biblioteca do programa, através do botão *Material Database*, e optar pelo material pretendido para a primeira camada do elemento construtivo, através do botão *Assign*; II) Adicionar uma nova camada, através do botão *New Layer*, e repetir os passos anteriores. O segundo passo será repetido tantas vezes quanto o número de camadas que compõem o elemento construtivo.

Na biblioteca do programa é possível consultar as propriedades básicas e as propriedades complementares de cada material (i.e. *Hygric Extensions*), sendo estas últimas apresentadas graficamente e através de uma tabela. A opção por um material existente na biblioteca implica em primeiro lugar escolher uma das espessuras existentes, e só após essa escolha se torna possível modificar o valor da espessura.

#### 4.2.1.2. Pontos de monitorização

Neste campo do programa WUFI® o utilizador escolhe a posição dos pontos de monitorização ao longo do elemento construtivo recorrendo à interface gráfica ou através da tabela numérica (i.e. *Table: Subdivision – Monitor Positions*). A vantagem desta última é que permite uma maior exactidão na escolha da posição dos pontos de monitorização.

O programa adopta automaticamente como pontos de monitorização a superfície exterior e a interior, e as interfaces entre as camadas que constituem o elemento construtivo. Contudo, existe a possibilidade de introduzir pontos de monitorização adicionais. A vantagem da introdução destes pontos prende-se com o facto de permitir aceder à variação da temperatura [ $\theta$ , °C], da humidade relativa [HR, %] e da pressão parcial de vapor de água [ $P_v$ , hPa] ao longo do período de cálculo adoptado, logo, esta

---

<sup>50</sup> O valor da resistência térmica é referente ao material no estado seco.

<sup>51</sup> O valor do coeficiente de transmissão térmica é referente ao elemento construtivo no estado seco e aos valores das resistências térmicas superficiais adoptados nos coeficientes de superfície (vd. Subcapítulo 4.2.3.1).

caracterização de posições específicas permite caracterizar o comportamento higrotérmico de um elemento construtivo (vd. Subcapítulo 3.1.3).

#### 4.2.1.3. Malha numérica

A malha numérica pode ser gerada automaticamente pelo programa (i.e. *Automatic Grid*) ou dimensionada pelo utilizador (i.e. *Table: Subdivision – Grid*). Em relação às malhas automaticamente geradas é possível optar por uma malha grosseira (i.e. *Coarse*), uma malha intermédia (i.e. *Medium*) ou uma malha refinada (i.e. *Fine*).

A malha é apropriada quando permite que a distribuição da temperatura e da humidade ao longo da secção transversal do elemento construtivo seja resolvida adequadamente. De uma forma geral a malha gerada automaticamente (i.e. malha intermédia) é suficiente para efectuar os cálculos de transporte simultâneo de calor e de humidade [41].

#### 4.2.1.4. Fontes de calor, humidade e ventilação

Após a definição da malha numérica o programa apresenta a possibilidade de introduzir fontes ou dissipadores de calor, de humidade ou de ventilação no elemento construtivo. O programa apresenta duas representações gráficas da malha numérica: a superior corresponde à malha numérica do elemento construtivo completo; e a inferior à malha numérica da camada seleccionada.

A malha numérica é dividida em três linhas: a superior apresenta a posição dos pontos de monitorização; a intermédia a posição das fontes de calor; e a inferior a posição das fontes de humidade. Ao contrário das fontes de calor e de humidade, em que existe a possibilidade de introduzir alterações em um, em vários elementos da malha numérica, ou em toda a camada seleccionada, a introdução de uma fonte de ventilação apenas permite introduzir alterações em toda a camada seleccionada.

### 4.2.2. Orientação e Inclinação do elemento construtivo, e Altura do edifício

O presente subcapítulo apresenta as opções existentes em relação à orientação e à inclinação do elemento construtivo, e à altura do edifício. A necessidade de especificar estes três parâmetros está relacionada com o tipo de ficheiro climático adoptado, já que na presente dissertação se opta pelo ficheiro climático de Lisboa (i.e. do tipo \*.wac) [41].

#### 4.2.2.1. Orientação do elemento construtivo

A orientação corresponde à direcção da normal da superfície do elemento construtivo. É um parâmetro necessário não só para o cálculo da chuva incidente, já que o coeficiente  $R_s$  é perpendicular à superfície do elemento construtivo (vd. Subcapítulo 4.2.3.5), como também para a quantificação da radiação solar que incide na superfície do elemento construtivo. O programa de cálculo WUFI® apresenta oito direcções possíveis, coincidentes com os oito pontos cardeais (i.e. N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

#### 4.2.2.2. Inclinação do elemento construtivo

A inclinação é o ângulo obtido entre a superfície do elemento construtivo e a horizontal. Este valor varia entre o valor nulo e 90°, que corresponde a uma superfície horizontal (e.g. laje de cobertura) e uma superfície vertical (e.g. parede vertical), respectivamente. É um parâmetro também necessário para quantificar a chuva incidente e radiação solar incidente.

#### 4.2.2.3. Altura do edifício

A altura do edifício que corresponde à solução construtiva adoptada influencia o cálculo da chuva incidente. O programa de cálculo WUFI® apresenta dois métodos para calcular a carga da chuva incidente: através dos coeficientes de chuva incidente R1 e R2; ou através do *ASHRAE Standard 160P “Design Criteria for Moisture Control in Buildings”*.

A metodologia de cálculo através dos coeficientes R1 e R2 estima a carga de chuva incidente através dos seguintes dados: chuva normal; velocidade e direcção média do vento. Estes dados são obtidos a partir do ficheiro climático adoptado. A metodologia de cálculo através dos coeficientes de chuva incidente recorre à seguinte equação:

$$DRL = RN \cdot (R1 + R2 \cdot v_{wind}) \quad 4.9$$

Onde,

*DRL* Driving Rain Load [l/m<sup>2</sup>.h];

*RN* Quantidade de chuva normal [l/m<sup>2</sup>.h];

*R1* Coeficiente de chuva incidente [-];

*R2* Coeficiente de chuva incidente [s/m];

*v<sub>wind</sub>* Velocidade do vento [m/s].

A velocidade do vento da equação 4.9 corresponde à componente da velocidade média do vento perpendicular à superfície do elemento construtivo. Esta componente é obtida através da velocidade média e da direcção média do vento.

Os coeficientes R1 e R2 variam ao longo da superfície do elemento construtivo e foram determinados com base em simulações de dinâmica de fluídos tridimensionais dos fluxos de gotas de água. Enquanto o valor do coeficiente R1 é nulo para superfícies verticais, o valor do coeficiente R2 varia de 0,05 a 0,20 s/m. O valor 0,07 s/m corresponde ao centro da superfície do elemento construtivo e o valor 0,20 s/m corresponde a uma localização em que não existe influência dos obstáculos envolventes.

No caso de se considerar uma superfície vertical (i.e. ao escolher uma inclinação de 90°) o programa de cálculo permite optar entre um edifício de baixa altura e um edifício alto. Em relação ao primeiro tipo de edifício a sua altura máxima é 10 metros. Em relação ao segundo tipo os edifícios são divididos em três zonas: inferior, abaixo dos 10 metros; intermédia, entre os 10 e os 20 metros; superior, acima dos 20 metros. A opção pelo tipo de edifício, e pela zona no edifício alto, implica valores de coeficientes de chuva incidente distintos (vd. Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Valores dos coeficientes de chuva incidente em função da altura do edifício para paredes verticais

Coeficientes de chuva incidente	Edifício baixo	Edifício alto		
		Zona inferior	Zona intermédia	Zona superior
R1 [-]	0,00	0,00	0,00	0,00
R2 [s/m]	0,07	0,05	0,10	0,20

É interessante verificar que apesar de corresponderem a edifícios de tipologia distinta, o edifício de altura baixa e a zona inferior do edifício alto têm o mesmo limite, i.e. 10 metros de altura, contudo, é atribuído um valor de coeficiente R2 diferente, sendo o valor que corresponde ao edifício de baixa altura superior.

Uma vez que a maioria dos elementos construtivos possuem uma capacidade moderada de absorção de água, nem toda a chuva que incide na superfície é absorvida. Este facto permite apenas estimar a quantidade de chuva incidente em vez de ser necessário determinar o seu valor exacto. É importante constatar que nestes casos, apesar de ser possível apenas estimar o valor da quantidade de chuva incidente, o intervalo de tempo segundo o qual ocorre a precipitação é bastante relevante.

### 4.2.3. Coeficientes de transferência de superfície

Em seguida, são apresentados e descritos os coeficientes de transferência de superfície para o clima exterior que o programa WUFI® considera nos cálculos efectuados: resistência térmica superficial exterior [ $R_{se}$ ,  $m^2.K/W$ ]; espessura da camada de ar de difusão equivalente [ $S_d$ , m]; factor de absorção de radiação por onda-curta [ $a_s$ , -]; emissividade de radiação por onda-longa [ $\varepsilon$ , -]; factor de absorção de chuva incidente [ $a_r$ , -].

No clima interior os únicos coeficientes de transferência de superfície considerados são a resistência térmica superficial interior [ $R_{si}$ ,  $m^2.K/W$ ] e a espessura da camada de ar de difusão equivalente [ $S_d$ , m].

#### 4.2.3.1. Resistência térmica superficial

O programa apresenta a opção de calcular a *resistência térmica superficial exterior* em função do vento, caso o ficheiro climático possua a variação da velocidade e da direcção do vento ao longo do ano de referência. Em caso de inexistência destes dados o programa adopta um valor constante em função das características do clima.

No caso de um paramento em contacto com o clima exterior a *resistência térmica superficial exterior* adoptada pelo programa é  $0,0588 m^2.K/W$ . Este valor pode suscitar alguma estranheza, visto que difere do valor normalmente utilizado em Portugal, isto é, a *condutância térmica superficial exterior*<sup>52</sup> adoptada pelo programa é  $17 W/m^2.K$ , o que implica um valor de  $0,0588 m^2.K/W$ , enquanto em Portugal se adopta  $25 W/m^2.K$ , o que implica um valor de  $0,04 m^2.K/W$ . Esta diferença deve-se ao facto de as condições do meio ambiente exterior na Alemanha serem melhor representadas pelo primeiro valor, dado a velocidade média do vento ser inferior à correspondente de uma *condutância térmica superficial exterior*  $25 W/m^2.K$  [31].

No ficheiro climático de Lisboa<sup>53</sup> existe a informação necessária para o cálculo da *resistência térmica superficial exterior* a partir das características do vento actuante. De forma a obter os valores mais próximos da realidade optou-se por obter a *resistência térmica superficial exterior* em função do vento.

A *condutância térmica superficial* em função do vento depende da direcção do vento que se faz sentir. Se o elemento construtivo em análise se encontrar na direcção contrária à do vento e a inclinação deste for superior a  $10^\circ$  o programa recorre à seguinte equação:

$$h = 0,33 \times v_{wind} + 4,5 + 6,5 \quad 4.10$$

Onde,

$h$  Condutância térmica superficial [ $W/m^2.K$ ];  
 $v_{wind}$  Velocidade do vento [ $m/s$ ].

Em qualquer outra situação o programa recorre à seguinte equação:

$$h = 1,60 \times v_{wind} + 4,5 + 6,5 \quad 4.11$$

Onde,

$h$  Condutância térmica superficial [ $W/m^2.K$ ];  
 $v_{wind}$  Velocidade do vento [ $m/s$ ].

O valor  $4,5 W/m^2.K$  corresponde à parcela de convecção, para uma velocidade nula do vento, enquanto  $6,5 W/m^2.K$  se refere à parcela de radiação da *condutância térmica superficial*. É ainda possível afirmar, através das equações 4.10 e 4.11, que em ambas as situações a *condutância térmica superficial* é

<sup>52</sup> A *condutância térmica superficial* é o inverso da *resistência térmica superficial*.

<sup>53</sup> Ficheiro utilizado na presente dissertação.

directamente proporcional à velocidade do vento, logo, quanto maior for o valor da velocidade do vento, maior será o valor da condutância, o que implica um menor valor de *resistência térmica superficial*.

O programa de cálculo WUFI® possibilita a escolha do valor da *resistência superficial exterior* a partir de situações já caracterizadas na biblioteca do programa (i.e. *External Wall*; *Roof*; *Basement*; *Partition Wall (inner)*) ou a partir de dados que o utilizador queira introduzir (i.e. *User Defined*). O valor da *resistência térmica superficial interior* depende da opção adoptada no clima exterior, isto é, só é possível modificar o valor da *resistência térmica superficial interior* se se optar por introduzir o valor da *resistência térmica superficial exterior*.

Uma vez que a presente dissertação se baseia na análise de paredes exteriores, a *resistência térmica superficial interior* assume o valor constante 0,125 m<sup>2</sup>.K/W.

#### 4.2.3.2. Espessura da camada de ar de difusão equivalente

As trocas de vapor de água entre o meio ambiente e o paramento do elemento construtivo podem ser reduzidas ou mesmo impedidas caso seja aplicada uma camada que condicione este tipo de transporte (e.g. um sistema de pintura hidrófobo, barreira para-vapor, entre outros). Este tipo de camadas não implica alterações significativas na *resistência térmica* do elemento construtivo devido à sua reduzida espessura, apenas altera o valor da *resistência à difusão de vapor de água*, já que o seu valor de *permeabilidade ao vapor de água* é muito reduzido. Por isso, não é necessário conhecer nem o valor da espessura nem o valor da *condutibilidade térmica* destes materiais, mas apenas o valor da *resistência à difusão de vapor de água*.

O programa WUFI® possibilita o tratamento deste tipo de camadas através de duas formas distintas: a camada é introduzida no *component assembly*, como as restantes; ou adiciona-se à *resistência de difusão de vapor de água* característica das superfícies dos elementos construtivos (vd. Subcapítulo 2.2.3) a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* da camada de material. De notar que caso se opte pela segunda forma os restantes coeficientes de transferência superficiais não são alterados automaticamente, tornando-se necessário que seja o utilizador a introduzir tais alterações.

A *espessura da camada de ar de difusão equivalente* transforma uma camada de um determinado tipo de material com uma espessura  $s$  numa camada de ar com *resistência à difusão de vapor de água* igual de espessura  $s_d$ . Esta transformação é importante, pois permite caracterizar materiais cuja única informação pertinente é a sua resistência à difusão (i.e. retardadores de vapor, barreiras pára-vapor ou revestimentos superficiais hidrófobos).

A *espessura da camada de ar de difusão equivalente* é obtida através da seguinte equação:

$$s_d = \mu \times s \quad 4.12$$

Onde,

- $s_d$  Espessura da camada de ar de difusão equivalente [m];
- $\mu$  Factor de resistência à difusão de vapor [-];
- $s$  Espessura da camada de material [m].

Nas simulações higrótérmicas unidimensionais as membranas servem como retardadoras ou barreiras ao vapor de água. As membranas que são aplicadas à superfície do elemento construtivo, podem ser contabilizadas através de ambas as formas enunciadas anteriormente, ou são aplicadas no interior do elemento construtivo, em que apenas é possível serem contabilizadas caso sejam introduzidas na *component assembly* (e.g. barreira pára-vapor).

Ao introduzir as membranas na *component assembly* estas são substituídas por *membranas efectivas* de forma a facilitar os cálculos efectuados e a sua identificação na *compnent assembly*. As *membranas efectivas* são mais espessas (i.e. um milímetro de espessura) que as reais e as suas propriedades são alteradas de forma a obter o valor correcto do fluxo de vapor de água e do fluxo de calor.

O programa de cálculo disponibiliza três opções em relação ao valor da membrana: introduzir um valor pretendido pelo utilizador (“*User Defined*”); considerar que não existe *resistência à difusão de vapor de água* adicional (“*No coating*”) ou adoptar uma camada existente na sua biblioteca. É importante referir que algumas das camadas existentes na biblioteca do WUFI® são distintas, diferindo consoante o clima adoptado (i.e. exterior ou interior), já que os requisitos para cada clima são distintos.

A lista das camadas que o programa disponibiliza para o clima exterior e o clima interior, e respectiva *espessura da camada de ar de difusão equivalente* pode ser consultada no Quadro A.2 do Anexo A.

#### 4.2.3.3. Factor de absorção de radiação por onda-curta

A *condutância térmica superficial* tem em conta as trocas de radiação por onda-longa com os elementos que existem na envolvente. Uma vez que não se conhece a temperatura de tais elementos considera-se que possuam a mesma temperatura que a temperatura do ar. Contudo, existe a necessidade de contabilizar a radiação solar à parte, porque para além de não ser possível relacioná-la com a temperatura do ar, a radiação solar possui uma variação diurna muito acentuada [41].

O fluxo de calor derivado da radiação solar na superfície exterior do elemento construtivo é calculado através da seguinte equação [31]:

$$q = a_s \times I \quad 4.13$$

Onde,

- $q$  Fluxo de calor derivado da radiação solar por onda-curta [W/m<sup>2</sup>];
- $a_s$  Factor de absorção de radiação por onda-curta [-];
- $I$  Radiação solar vertical à superfície exterior do elemento construtivo [W/m<sup>2</sup>].

O *factor de absorção de radiação por onda-curta* indica a quantidade de radiação absorvida pela superfície exterior do elemento construtivo em relação à quantidade de *radiação solar global*<sup>54</sup> que incide na superfície exterior do elemento construtivo. A radiação solar vertical à superfície exterior do elemento construtivo depende da inclinação e da orientação da superfície [31].

O programa obtém a radiação solar vertical à superfície do elemento construtivo através do ficheiro climático adoptado, multiplicando-o pelo *factor de absorção de radiação por onda-curta*, caso a radiação solar vertical à superfície seja positiva, e pela *emissividade de radiação solar por onda-longa*, se for negativa [31].

#### 4.2.3.4. Emissividade de radiação por onda-longa

O valor da *emissividade de radiação por onda-longa* é obtido pelo programa de cálculo WUFI® consoante o tipo de superfície adoptada para o *factor de absorção de radiação por onda-curta*. O valor recomendado para materiais não metálicos é 0,9 [41].

Na versão do programa WUFI® utilizada na presente dissertação existem três métodos para contabilizar as trocas de radiação por onda-longa com o clima exterior: a *condutância térmica superficial*; o método simplificado; e o método do balanço de radiação explícito. O método simplificado e o método do balanço de radiação explícito precisam que exista no ficheiro climático a variação da radiação atmosférica ao longo do ano de referência. O método explícito utiliza ainda a variação do índice de nuvens ao longo do ano de referência. Contudo, para o ficheiro climático de Lisboa a informação sobre estes dois parâmetros não foi recolhida, impossibilitando a utilização destes dois métodos.

Uma vez que a informação necessária não se encontra disponível, não é possível contabilizar o fenómeno do arrefecimento nocturno nas simulações efectuadas. Neste caso o programa WUFI® contabiliza as

<sup>54</sup> A *radiação solar global* é igual à soma da *radiação solar directa* e da *radiação solar difusa*.

trocas de radiação de onda-longa através da *condutância térmica superficial* (vd. Subcapítulo 4.2.3.1). A diferença entre o dia e a noite é a fonte de calor devido à radiação ser nula durante a noite.

#### 4.2.3.5. Factor de absorção de chuva incidente

A chuva normal<sup>55</sup> possui apenas componente vertical em relação ao eixo horizontal, o que dificulta bastante a incidência deste tipo de precipitação em elementos construtivos verticais, logo, não promove alterações significativas no estado higrotérmico neste tipo de elementos construtivos.

A situação pode ganhar mais relevo quando à chuva normal é adicionado o efeito do vento. O efeito do vento implica que a chuva normal, que apenas compreende componente vertical, passe também a compreender uma componente horizontal. Esta componente horizontal possibilita a incidência de uma maior quantidade de água nos elementos construtivos verticais. Quanto maior for a intensidade do vento, maior será a componente horizontal da precipitação.

O embate da água nas superfícies verticais provoca o seu salpico<sup>56</sup>, ou seja, nem toda a chuva incidente pode ser considerada na condução capilar, pois existe uma porção de água que não adere à superfície. O parâmetro que permite ter em consideração esta situação é o *factor de absorção da chuva incidente* (i.e. *Rain Water Absorption Factor*). Este parâmetro varia entre o valor nulo e o unitário, dependendo das características da superfície (i.e. rugosidade, orientação e inclinação) e do tipo de precipitação (i.e. chuva, neve, entre outros) [41].

O fluxo de água numa superfície exterior, desde que esta não esteja completamente molhada, é obtido pela seguinte equação [31]:

$$g_w = a_r \times R_s \quad 4.14$$

Onde,

$g_w$  Fluxo de água na superfície [kg/m<sup>2</sup>.s];

$a_r$  Factor de absorção da chuva incidente [-];

$R_s$  Carga de precipitação vertical à superfície do elemento construtivo [kg/m<sup>2</sup>.s].

O *factor de absorção da chuva incidente* pode ser estimado, no caso de elementos construtivos constituídos por materiais que possuem uma absorção de água moderado [31], e um valor razoável a adoptar é 0,7 [41]. Contudo, caso os materiais possuam uma absorção de água elevado (e.g. alvenaria aparente ou fachada de pedra natural) este factor deve ser determinado experimentalmente [31].

É importante referir que alguns dos elementos construtivos analisados na presente dissertação (vd. Capítulo 6) se encontram contempladas no segundo caso. No entanto, por não se enquadrar no âmbito da presente dissertação optou-se por adoptar o valor recomendado (i.e. 0,7).

No caso de uma superfície horizontal a ocorrência de salpico não é importante, uma vez que as gotas de água voltam à superfície horizontal devido à influência da gravidade. Neste caso o *factor de absorção da chuva incidente* adopta o valor unitário, ou seja, toda a água que incide sobre a superfície pode ser considerada na condução capilar.

O *factor de absorção da chuva incidente* é muito relevante na presente dissertação, pois permite demonstrar a importância da chuva incidente no transporte simultâneo de calor e de humidade. Para tal efectuam-se duas simulações com os mesmos *inputs* com excepção deste factor: numa simulação assume-se o valor recomendado e na outra simulação opta-se pelo valor nulo. A partir dos resultados obtidos averigua-se a importância da chuva incidente no elemento construtivo analisado.

---

<sup>55</sup> Entende-se por chuva normal a que possui apenas componente vertical em relação ao eixo horizontal, ou seja, a que não foi influenciada pelo vento.

<sup>56</sup> O salpico ocorre devido a características da superfície e da chuva incidente.



#### 4.2.4. Condições iniciais

O programa tem em conta as condições iniciais, mais concretamente a humidade relativa e de temperatura, a que as camadas que compõem o elemento construtivo estão sujeitas no início das simulações.

Tanto a humidade relativa inicial<sup>57</sup> como a temperatura inicial podem ser caracterizadas por um valor constante ao longo da solução construtiva (i.e. *Constant Across Component*) ou obter os seus perfis<sup>58</sup> recorrendo a um ficheiro externo (i.e. *Read from File*). No entanto, a humidade relativa inicial pode ainda ser caracterizada por um valor referente a cada camada da solução construtiva (i.e. *In each Layer*).

##### 4.2.4.1. Constant Across Component

Nesta opção é necessário adoptar um valor constante de humidade relativa inicial e de temperatura inicial ao longo do elemento construtivo. É ainda impossível modificar o valor de teor de água correspondente à humidade relativa adoptada.

Em relação à humidade relativa o programa adopta o valor predefinido de 80 %, pois refere-se ao valor representativo do material de construção que esteve protegido da precipitação e radiação solar directa. Este valor possui ainda o significado de ser o valor médio anual de humidade relativa exterior na Alemanha [41].

O valor de teor de água é determinado através da humidade relativa adoptada e recorrendo à *curva de armazenamento de humidade*. Uma vez que a *curva de armazenamento de humidade* é característica de cada material, e apesar do valor de humidade ser constante ao longo de toda a secção, o valor de teor de água obtido é diferente consoante o material.

No que diz respeito ao perfil de temperatura este tende a ser idêntico às condições de fronteira predominantes num curto intervalo de tempo, tornando-se assim razoável considerar um valor constante ao longo do elemento construtivo. Apenas será necessário um perfil inicial mais detalhado, caso as simulações desenvolvidas possuam uma duração muito reduzida [41], algo que não se enquadra no âmbito da presente dissertação.

##### 4.2.4.2. In each layer

Nesta opção é possível adoptar um valor de teor de água ou um valor típico de humidade no material de construção aquando da execução do elemento construtivo (i.e. *Assign Typical Built-in Moisture*) para cada material constituinte do elemento construtivo.

Adopta-se o valor típico de humidade quando os materiais de construção possuem um elevado teor de água no seu interior. Este elevado valor pode dever-se à necessidade de água para a produção de um material (e.g. argamassa de assentamento) ou quando os materiais armazenados não são devidamente protegidos da precipitação e radiação solar [41].

No caso dos materiais que necessitam de água para a sua produção o valor de teor de água obtido será aproximadamente o *teor de água de saturação* [41].

---

<sup>57</sup> Entende-se por humidade relativa inicial o valor correspondente à humidade relativa de um material no início das simulações. A mesma definição é aplicada à temperatura inicial.

<sup>58</sup> Quando se recorre à opção *Read from file* a humidade relativa e a temperatura podem assumir valores distintos ao longo do elemento construtivo, daí ser necessário a construção de perfis destes parâmetros em função da secção transversal.

#### 4.2.4.3. Read from file

Nesta opção os perfis do teor de água e da temperatura são obtidos recorrendo a um ficheiro externo, que pode ser conseguido através de simulações anteriores ou referente a medições de um elemento construtivo real.

A possibilidade de obter ambos os perfis recorrendo a um ficheiro externo é bastante interessante na questão da reabilitação, pois possibilita as simulações de um elemento construtivo com necessidade de intervenção recorrendo às suas condições actuais<sup>59</sup> e permite entender quais serão as possíveis alterações do elemento construtivo ao longo do período de simulação considerado.

### 4.3. Controlo

O presente capítulo aborda em primeiro lugar o período de cálculo da simulação, os respectivos perfis de temperatura, humidade relativa e teor de água, e o intervalo de tempo entre as iterações dos cálculos (i.e. *time step*). Em segundo lugar apresenta as alterações numéricas que o utilizador pode implementar na metodologia de cálculo do programa.

A escolha do período de cálculo, i.e. das datas que limitam os intervalos de tempo contidos no período de cálculo, condiciona os perfis de temperatura, humidade relativa e teor de água em termos de quantidade de perfis e quais as datas que são comparadas. De notar que este subcapítulo também aborda o *time step*, ou seja, o intervalo de tempo entre as iterações dos cálculos.

Em relação às alterações numéricas o programa permite alterar as equações de transporte consideradas, excluir determinados mecanismos de transporte, e resolver problemas numéricos da simulação.

#### 4.3.1. Período de cálculo e perfis

Neste campo do programa de cálculo WUFI® o utilizador escolhe o intervalo de tempo da simulação introduzindo a data do início e do fim do período de cálculo, e especifica o intervalo de tempo entre iterações (i.e. *time step*).

O programa de cálculo produz automaticamente um perfil<sup>60</sup> de temperatura, de humidade relativa e de teor de água para as datas que limitam o intervalo de tempo adoptado. O programa permite ainda introduzir datas extra possibilitando o aumento do número de perfis.

Como exemplo, adopta-se um intervalo de tempo compreendido entre 1 de Janeiro de 2015 e 1 de Janeiro de 2016, logo, um ano de período de cálculo. O programa de cálculo constrói os perfis de temperatura, de humidade relativa, e de teor de água, o que possibilita a comparação entre as datas que limitam o intervalo de tempo de cada um destes conceitos. Considera-se agora que também se pretende averiguar a estado do elemento construtivo a meio do período de cálculo. Para tal apenas é necessário introduzir uma data extra (i.e. 1 de Julho de 2015) o que implica que o período de cálculo passe a compreender o intervalo de tempo entre 1 de Janeiro de 2015 e 1 de Julho de 2015, e o intervalo entre 1 de Julho de 2015 e 1 de Janeiro de 2016. O programa constrói os três perfis para cada um destes intervalos de tempo, possibilitando a comparação dos valores correspondentes às datas que limitam cada intervalo de tempo.

O programa de cálculo recorre a um ficheiro climático do clima adoptado que não corresponde a nenhum ano específico. Este facto permite que o período de cálculo compreenda qualquer dimensão adoptada pelo utilizador.

O programa permite especificar qual o intervalo de tempo entre as iterações dos cálculos efectuados numa simulação (i.e. *time step*), sendo a unidade a hora. É possível adoptar qualquer valor, contudo,

---

<sup>59</sup> As condições actuais de uma solução construtiva com necessidade de intervenção diferem das condições existentes aquando da sua construção, pois já decorreu tempo suficiente para se atingir o equilíbrio dinâmico [41].

<sup>60</sup> Consiste na apresentação da variação da temperatura, da humidade relativa e do teor de água ao longo do elemento construtivo para as datas que limitam o intervalo de tempo adoptado.

deve ter-se em conta que este valor não pode ser superior ao intervalo de tempo dos dados climáticos. Em relação ao ficheiro climático de Lisboa os dados são apresentados com uma periodicidade horária, logo, o *time step* não pode ser superior a este valor. Na presente dissertação adoptou-se o *time step* unitário.

#### 4.3.2. Alterações numéricas

Neste campo do programa de cálculo WUFI® é possível: escolher quais as equações de transporte consideradas nos cálculos efectuados (i.e. *Mode of Calculation*); excluir determinados mecanismos de transporte nos cálculos efectuados (i.e. *Hygrothermal Special Options*); e resolver problemas numéricos da simulação detectados devido a um grande número de falhas de convergência ou uma diferença significativa entre os balanços de água (i.e. *Numerical Parameters*).

Em relação ao modo de cálculo o programa permite que sejam efectuadas simulações com o transporte simultâneo de calor e de humidade, situação predefinida, ou permite que se opte apenas por uma equação de transporte. Esta funcionalidade permite identificar qual o contributo de cada uma das equações de transporte no comportamento higrotérmico do elemento construtivo.

Em relação à possibilidade de excluir determinados mecanismos de transporte o programa permite efectuar as simulações sem considerar: a condução capilar (i.e. *Excluding Capillary Conduction*); o calor latente de evaporação<sup>61</sup> (i.e. *Excluding Latent Heat of Evaporation*); e o calor latente de fusão<sup>62</sup> (i.e. *Excluding Latent Heat of Fusion*). Esta funcionalidade permite identificar o contributo de cada um destes mecanismos no comportamento higrotérmico do elemento construtivo.

Em relação à resolução de problemas numéricos da simulação o programa permite: aumentar a precisão (i.e. *Increased Accuracy*); e adoptar convergência (i.e. *Adapted Convergence*). Optar pelo aumento da precisão é mais eficaz que optar pela convergência [41]. O intervalo de tempo que o programa de cálculo necessita para efectuar os cálculos da simulação aumenta caso se recorra a estas opções [41].

#### 4.4. Condições climáticas

O comportamento higrotérmico de um elemento construtivo é bastante influenciado pelas condições dos climas fronteira. O programa WUFI® necessita da variação dos seguintes parâmetros para que seja possível caracterizar as condições dos climas: humidade relativa exterior e interior; temperatura exterior e interior; quantidade de chuva incidente; e radiação solar incidente no paramento exterior.

O programa de cálculo possui ficheiros climáticos que descrevem o clima exterior de vários locais na Europa e outros continentes. Contudo, em Portugal só existe o ficheiro climático de Lisboa, o que implicou recorrer apenas a este ficheiro, uma vez que a presente dissertação se foca nas simulações de elementos construtivos verticais no clima portugueses.

O clima interior pode ser simulado através de curvas sinusoidais ou através de modelos apropriados que permitem obter as condições do clima interior através do clima exterior. Estes modelos encontram-se descritos nas seguintes normas: ASHRAE 160 [1]; EN 15026:2007 [14]; e EN ISO 13788:2001 [15].

O programa possui a funcionalidade de analisar o ficheiro climático adoptado (i.e. *Climate Analysis*) e apresentar os valores mínimos, máximos e médios da temperatura e humidade relativa, a quantidade de chuva normal num ano, e a distribuição direccionada da radiação solar e da chuva incidente.

A cada paramento do elemento construtivo é associado um clima, podendo os climas ser idênticos ou distintos, consoante o pretendido. No entanto, apenas o paramento esquerdo permite contabilizar o efeito da chuva incidente e da radiação solar nas simulações efectuadas.

---

<sup>61</sup> Processo de passagem do estado líquido para o gasoso. Uma vez que se transita para um estado de agitação molecular superior ocorre absorção de energia do sistema (reação endotérmica) e consequentemente existe uma redução do valor da temperatura.

<sup>62</sup> Processo de passagem do estado sólido para o líquido, ou seja, é uma reação endotérmica, o que implica a diminuição da temperatura.

Em primeiro lugar enumeram-se os dados necessários para descrever o meio ambiente exterior, e em segundo lugar descreve-se as metodologias passíveis de simular o meio ambiente interior.

#### 4.4.1. Meio ambiente exterior

Ao adoptar um ficheiro climático dos que constam na biblioteca do programa de cálculo obtém-se a representação gráfica da variação da temperatura e da humidade relativa ao longo do ano de referência. A linha fina representa a informação obtida a partir do ficheiro climático, e a linha mais espessa representa o valor médio dessa informação, de modo a facilitar a percepção da variação da informação.

A caracterização do meio ambiente exterior nas simulações mencionadas na presente dissertação é efectuada a partir do ficheiro climático de Lisboa, que se trata de um ficheiro climático do tipo \*.wac. No Quadro A.7 do Anexo A são apresentados os significados e as unidades dos vários símbolos utilizados neste tipo de ficheiro climático.

É interessante verificar que as curvas sinusoidais, as metodologias de cálculo inerente à norma EN ISO 13788:2001 [15] e à norma EN 15026:2007 [14] podem simular o clima exterior. Contudo, tal apenas é possível se não se considerar o efeito da chuva e da radiação solar. Quanto se utiliza qualquer uma destas três metodologias de cálculo para simulação do clima exterior não é necessário especificar a orientação e a inclinação do elemento construtivo.

#### 4.4.2. Meio ambiente interior

O presente subcapítulo descreve três das quatro metodologias de cálculo que permitem caracterizar as condições do meio ambiente interior, e que correspondem às metodologias utilizadas no continente europeu: as curvas sinusoidais; a norma EN ISO 13788:2001 [15]; e a norma EN 15026:2007 [14].

##### 4.4.2.1. Curvas sinusoidais

A curva sinusoidal permite simular o clima interior, no entanto, apenas se deve recorrer a esta metodologia quando as flutuações das condições do clima apenas ocorrem a longo prazo (e.g. anuais) e não a curto prazo.

O programa de cálculo gera a curva sinusoidal da temperatura com duração anual recorrendo aos seguintes parâmetros: o valor médio anual da temperatura; a amplitude; e o dia a que corresponde o valor máximo da temperatura. É possível optar por valores referentes a situações já descritas na biblioteca do programa (vd. Quadro A.3, no Anexo A) ou por valores especificados pelo utilizador (i.e. *User Defined Sine Curve Parameter*).

A curva sinusoidal da humidade relativa é gerada a partir dos mesmos parâmetros que a curva sinusoidal da temperatura mas em relação à humidade, logo, é necessário especificar a carga de humidade referente ao clima interior. É possível optar por valores referentes a situações já descritas na biblioteca do programa (vd. Quadro A.4, no Anexo A) ou por valores especificados pelo utilizador (i.e. *User Defined Sine Curve Parameter*).

A carga de humidade é igual à diferença entre a concentração de vapor de água referente ao clima interior e a concentração de vapor de água referente ao clima exterior, obtendo-se a partir da produção de vapor de água no compartimento e da taxa de renovação (i.e. *Air change rate*) [41]:

$$ML = \frac{MP}{n} \quad 4.15$$

Onde,

$ML$  Carga de humidade [ $\text{g}/\text{m}^3$ ];  
 $MP$  Produção de humidade [ $\text{g}/\text{m}^3.\text{h}$ ];  
 $n$  Taxa de renovação [ $\text{h}^{-1}$ ].

#### 4.4.2.2. EN ISO 13788:2001

A metodologia de cálculo da norma EN ISO 13788:2001 [15] recorre às condições do clima exterior de forma a caracterizar o clima interior. O valor da temperatura interior é constante ao longo do *ano de referência*, sendo possível alterar o valor padrão (i.e. 20 °C). A humidade relativa interior é obtida a partir do valor médio mensal da temperatura exterior (vd. Fig. A.1, no Anexo A), sendo possível optar por uma das *quatro classes de humidade*<sup>63</sup> (vd. Quadro A.5, no Anexo A) ou especificar um valor (i.e. *User defined*).

A humidade relativa interior é obtida através da humidade absoluta interior e da temperatura interior. A humidade absoluta interior é obtida recorrendo à seguinte equação [41]:

$$N_i = N_a + \delta N \quad 4.16$$

Onde,

$N_i$  Humidade absoluta interior [kg/m<sup>3</sup>];

$N_a$  Humidade absoluta exterior [kg/m<sup>3</sup>];

$\delta N$  Suplemento de humidade [kg/m<sup>3</sup>];

O suplemento de humidade é obtido a partir da temperatura média exterior mensal através de seguinte equação [41]:

$$N_a = \varphi_a \cdot \text{humidade\_absoluta\_na\_satura\c{c}\~{a}\~{o}}(\theta_a) \quad 4.17$$

Onde,

$N_a$  Humidade absoluta exterior;

$\varphi_a$  Humidade relativa média exterior mensal [-];

$\theta_a$  Temperatura média exterior mensal [°C].

#### 4.4.2.3. EN 15026:2007

A metodologia de cálculo da norma EN 15026:2007 [14] recorre às condições do clima exterior de forma a caracterizar o clima interior. O valor da temperatura interior é obtido através do valor médio diário da temperatura exterior (vd. Fig. A.2, no Anexo A). A humidade relativa interior também é obtida a partir do valor médio diário da temperatura exterior (vd. Fig. A.2, no Anexo A), existindo dois níveis de carga de humidade (vd. Quadro A.6, no Anexo A).

---

<sup>63</sup> De notar que no anexo A da norma EN ISO 13788:2001 [15] são descritas cinco classes de humidade, no entanto, o programa de cálculo apenas apresenta as quatro primeiras classes.



## 5. CLIMAS FRONTEIRA E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

No presente capítulo apresenta-se em primeiro lugar a variação dos parâmetros que caracterizam o clima exterior e o clima interior, e em segundo lugar referem-se os pressupostos considerados na construção das soluções construtivas simuladas. Por último apresentam-se as propriedades básicas e complementares dos materiais simulados.

### 5.1. Clima exterior e interior

Na presente dissertação os dados climatéricos exteriores são referentes a Lisboa, pois é a única cidade portuguesa que consta na biblioteca do programa. Este ficheiro climático é do tipo \*.wac e possui os seguintes dados com periodicidade horária: direcção<sup>64</sup> [WD, graus] e velocidade [WS, m/s] do vento actuante; quantidade de chuva normal<sup>65</sup> [RN, mm/h]; pressão atmosférica [PSTA, hPa]; temperatura [TA, °C] e humidade relativa [HREL, -] do meio ambiente exterior; radiação directa horizontal por onda-curta [ISDH, W/m<sup>2</sup>] e radiação difusa por onda-curta [ISD, W/m<sup>2</sup>]. A variação destes valores é igual para todos os anos do período de cálculo, logo, existe apenas um ano de dados, denominado *ano de referência*.

Uma vez que a presente dissertação tem como propósito o estudo da influência da chuva incidente em elementos construtivos verticais optou-se pelo estudo da orientação Sudoeste, na medida que em Lisboa esta é a orientação em que se verifica uma maior quantidade de água incidente no paramento exterior [19]. Em relação à inclinação dos elementos construtivos adoptou-se um ângulo de 90°, uma vez que se trata de elementos construtivos verticais.

De acordo com a análise efectuada pelo programa de cálculo WUFI® sobre o ficheiro climático de Lisboa foram obtidas as seguintes informações: a temperatura mínima é 1,2 °C, a máxima é 37,0 °C e a média é 15,6 °C; a humidade relativa mínima é 25%, a máxima é 100% e a média é 75%; a chuva normal total é 675 mm/ano.

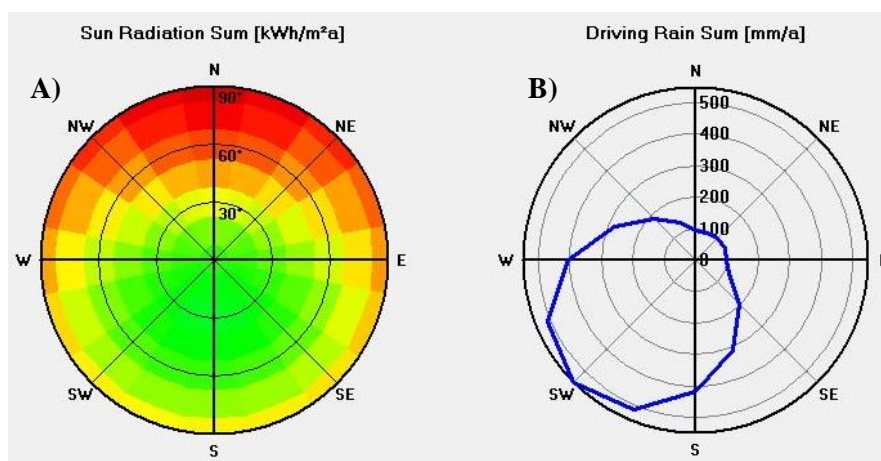


Figura 5.1 – Distribuição direccional da radiação solar (A) e da chuva incidente (B), retirado do programa de cálculo WUFI® para ficheiro climático de Lisboa

A rosa da radiação demonstra a soma anual da radiação solar na superfície<sup>66</sup> em função da orientação e da inclinação (varia de 0 a 90°, um elemento vertical corresponde a 90°) do elemento construtivo. A rosa da chuva incidente demonstra a soma anual da chuva incidente na superfície em função da orientação do elemento construtivo.

<sup>64</sup> Na direcção do vento considera-se o ponto cardeal Norte como valor inicial.

<sup>65</sup> Entende-se como chuva normal aquela que apenas possui componente vertical.

<sup>66</sup> Existe um código de cores em que os menores valores são apresentados a vermelho escuro, os valores médios a amarelo e valores mais elevados a verde.

Em seguida apresenta-se a variação, ao longo do ano de referência, dos seguintes parâmetros: temperatura e humidade relativa do meio ambiente exterior e interior; chuva incidente; radiação solar; *condutância térmica superficial*; e *coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão*. É importante realçar que, com excepção da temperatura e humidade relativa, todos estes parâmetros dependem da orientação e inclinação da fachada. No caso da chuva incidente e da radiação solar os valores apresentados ainda não foram multiplicados pelos respectivos factores de absorção.

### 5.1.1. Temperatura e humidade relativa do meio ambiente

A temperatura e a humidade relativa do meio ambiente exterior são obtidas a partir do ficheiro climático de Lisboa. A Figura 5.2 apresenta a variação da temperatura e humidade relativa ao longo do ano de referência. É visível que quando a temperatura atinge valores superiores, a humidade relativa diminui.

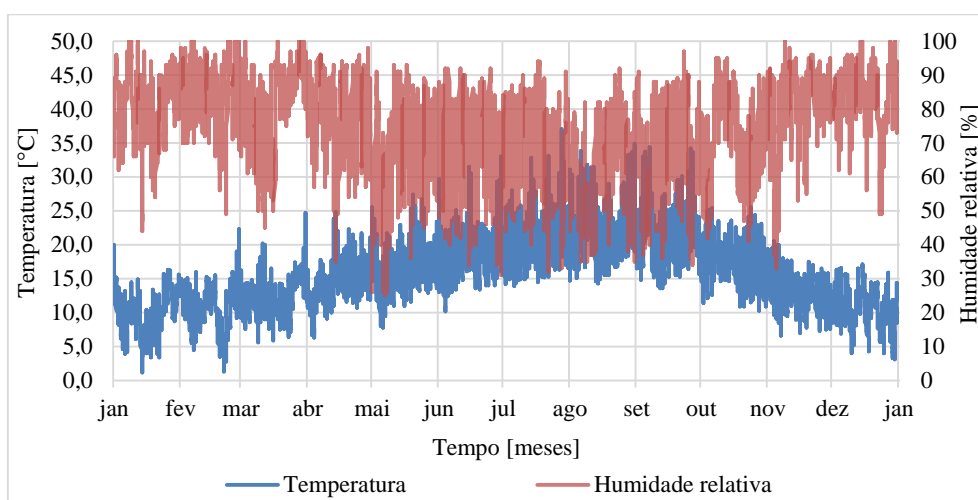


Figura 5.2 – Variação da temperatura e da humidade relativa do meio ambiente exterior ao longo do ano de referência. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

A temperatura e a humidade relativa do meio ambiente interior podem ser obtidas de diferentes modos (vd. Subcapítulo 4.4.2), que conduzem a resultados distintos. A Figura 5.3 apresenta a variação da temperatura do meio ambiente interior ao longo do ano de referência. A partir desta figura constata-se que a variação da temperatura referente à norma EN 15026 – *Normal Load* é a mais pronunciada e que é também nesta situação que são atingidos os valores mais elevados de temperatura. Existe uma sobreposição entre a temperatura de classe 3 e 4 da norma EN 13788, uma vez que se assume a mesma temperatura para ambas as classes (i.e. 20 °C).

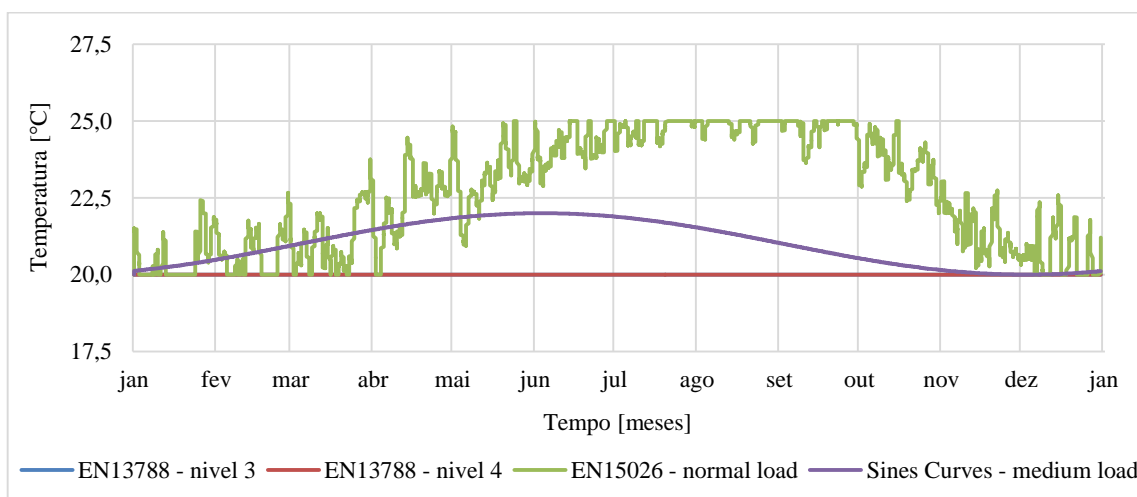


Figura 5.3 – Variação da temperatura do meio ambiente interior ao longo do ano de referência



A Figura 5.4 apresenta a variação da humidade relativa do meio ambiente interior ao longo do ano de referência. Verifica-se que em relação à humidade relativa a norma EN 15026 – *Normal Load* não é a que possui a variação mais pronunciada, nem a que atinge os valores mais elevados. Contudo, optou-se por adoptar a norma EN 15026 – *Normal Load* nas simulações efectuadas, uma vez que em termos de temperatura é a mais solicitante.

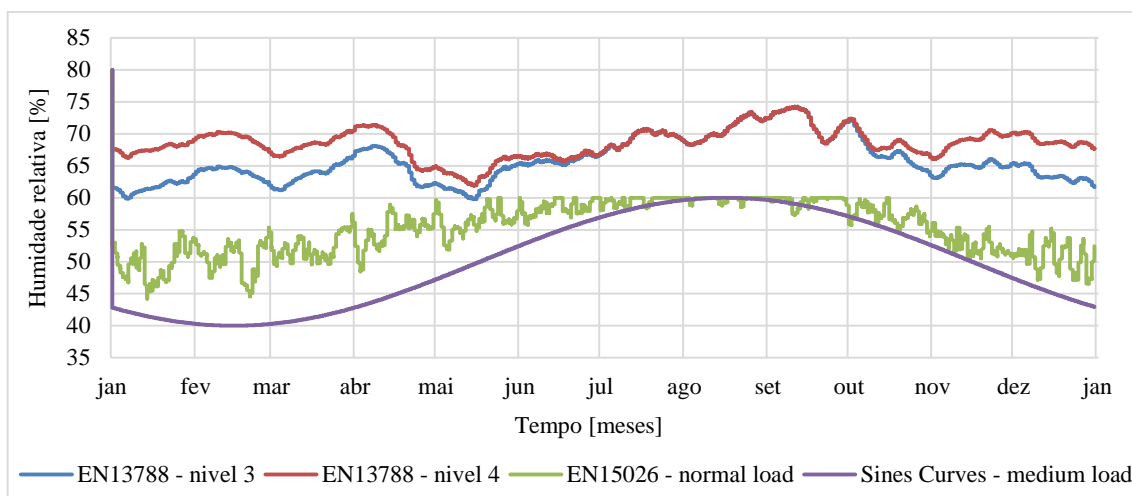


Figura 5.4 – Variação da humidade relativa do meio ambiente interior ao longo do ano de referência

A Figura 5.5 apresenta a variação da temperatura do meio ambiente exterior e do meio ambiente interior. A comparação permite verificar qual o sentido do fluxo de calor ao longo do ano de referência. Caso a temperatura interior seja superior à temperatura exterior (e.g. no mês de Janeiro) o fluxo de calor dá-se do interior para o exterior, caso seja inferior o fluxo de calor dá-se do exterior para interior.

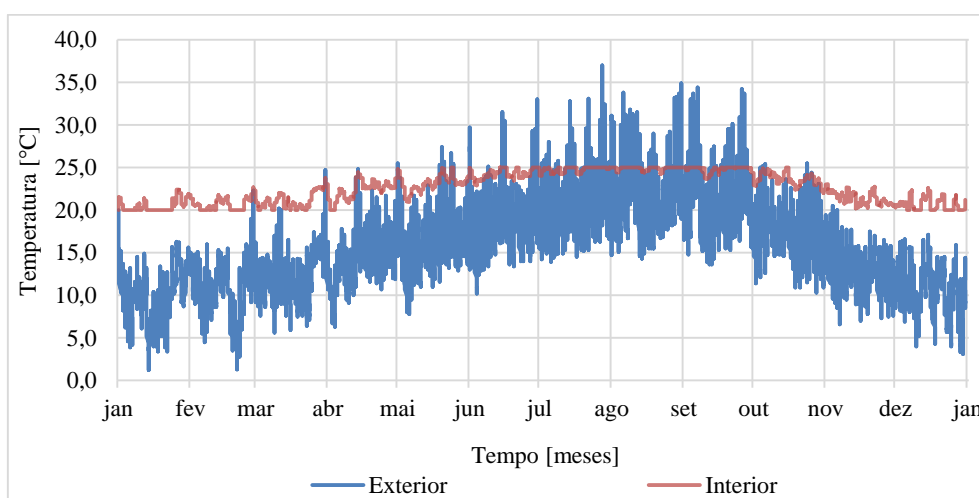


Figura 5.5 – Variação da temperatura do meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

A Figura 5.6 apresenta a variação da humidade relativa do meio ambiente exterior e do meio ambiente interior. Esta comparação permite verificar qual o sentido da condução capilar e da difusão de superfície, uma vez que a humidade relativa é o potencial de transporte. Caso a humidade relativa interior seja superior à exterior o fluxo de transporte ocorre do interior para o exterior, caso seja inferior ocorre do exterior para o interior.

Considerando o início do mês de Janeiro é possível constatar que: a temperatura interior é superior à exterior, e consequentemente o fluxo de calor ocorre do interior para o exterior; e a humidade relativa exterior é superior à interior, o que implica que a condução capilar ocorra do exterior para o interior.

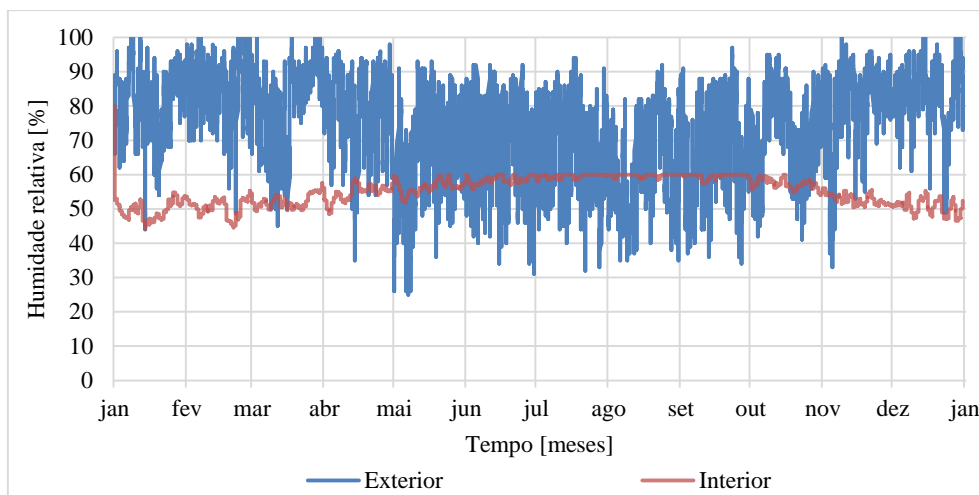


Figura 5.6 – Variação da humidade relativa do meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

### 5.1.2. Chuva incidente

A Figura 5.7 apresenta a quantidade de chuva incidente anual em função da orientação, sendo perceptível que o valor mais elevado é atingido para a orientação Sudoeste, aproximadamente 192 l/m<sup>2</sup>.h.

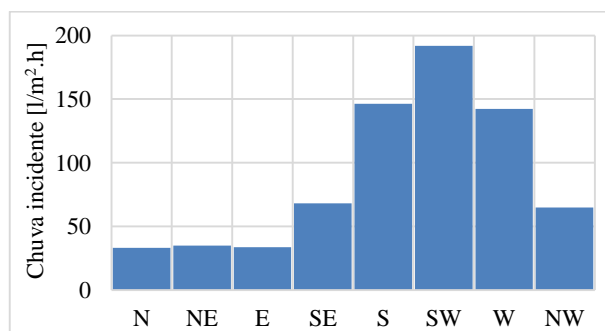


Figura 5.7 – Quantidade de chuva incidente anual em função da orientação

A Figura 5.8 apresenta a variação da chuva incidente ao longo do ano de referência para orientação Sudoeste. Esta foi a orientação adoptada nas simulações efectuadas, uma vez que se trata da orientação condicionante em termos de quantidade de chuva incidente anual. Verifica-se que a maior quantidade de água incide no paramento exterior do elemento construtivo entre os meses de Janeiro e Maio e entre os meses de Outubro e Dezembro, enquanto a quantidade de água que incide no paramento entre os meses de Junho e Setembro é praticamente nula (vd. Fig. B.1, no Anexo B).

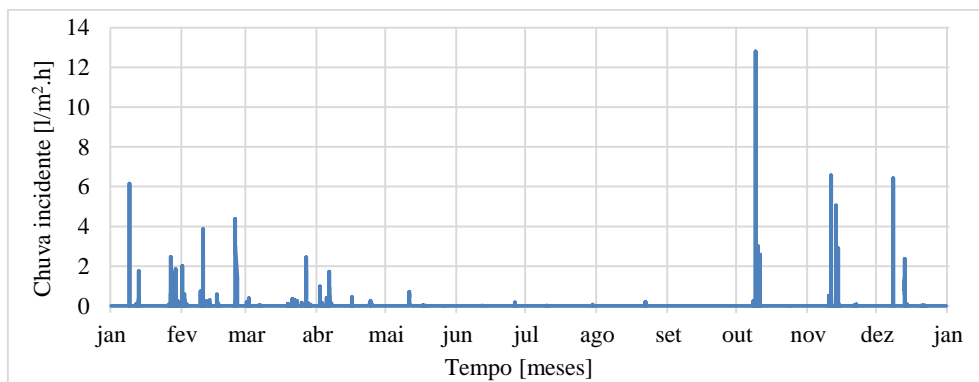


Figura 5.8 – Variação da chuva incidente para Sudoeste ao longo do ano de referência

### 5.1.3. Radiação Solar

A Figura 5.9 apresenta a quantidade de radiação solar anual em função da orientação, sendo o valor mais elevado referente à orientação Sudoeste, aproximadamente 1003 kW/m<sup>2</sup>.

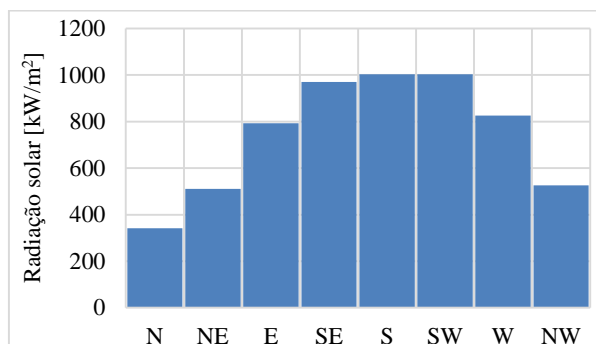


Figura 5.9 – Quantidade de radiação solar anual em função da orientação

A Figura 5.10 apresenta a variação da radiação solar para a orientação Sudoeste. Contudo, verifica-se que os valores mais elevados de radiação solar não coincidem com os valores mais elevados da temperatura exterior (vd. Figura 5.2).

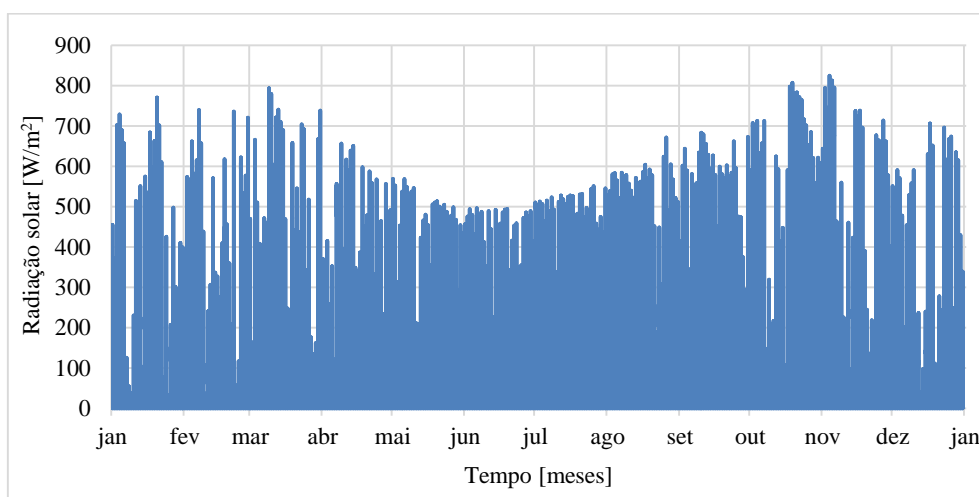


Figura 5.10 – Variação da radiação solar para Sudoeste ao longo do ano de referência

Ao comparar os valores referentes a cada mês com a variação da radiação solar ao longo do ano de referência para orientação Sudoeste verifica-se que os meses em que são atingidos os valores mais elevados de radiação solar não coincidem com os meses em que no paramento exterior incide maior quantidade de radiação solar. Enquanto o valor mais elevado da radiação solar é atingido em Novembro (vd. Figura 5.10), o mês em que incide maior quantidade de radiação solar no paramento exterior é Agosto (vd. Fig. B.2, no Anexo B).

### 5.1.4. Condutância térmica superficial

A Figura 5.11 apresenta a variação da *condutância térmica superficial exterior e interior*. Enquanto a *condutância térmica superficial exterior* varia ao longo do ano de referência, devido às características do vento incidente e às da fachada (vd. Subcapítulo 4.2.3.1), a *condutância térmica superficial interior* permanece constante ao longo do mesmo período, assumindo um valor de 8 W/m<sup>2</sup>.K.

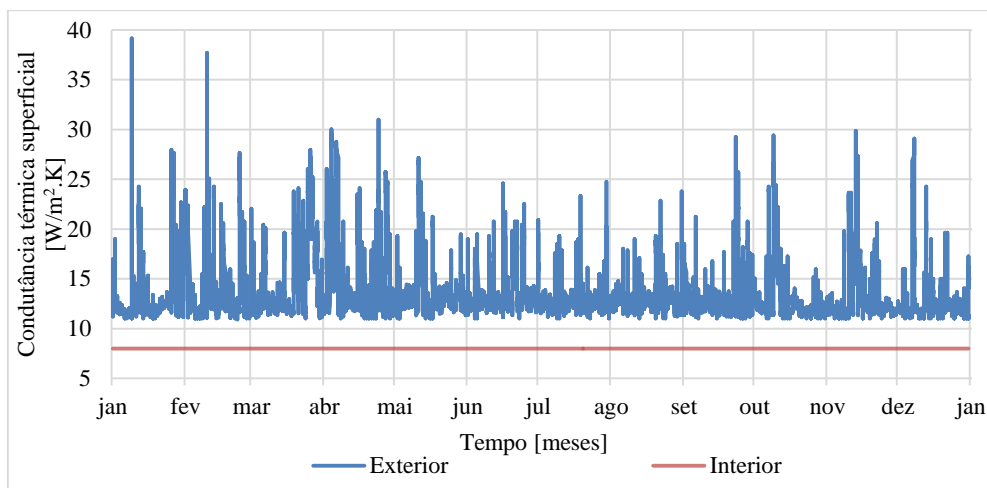


Figura 5.11 – Variação da condutância térmica superficial exterior e interior ao longo do ano de referência. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

### 5.1.5. Coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão

A Figura 5.12 apresenta a variação do *coeficiente de transferência de vapor de água para gradiente de pressão exterior e interior*. Uma vez que este coeficiente para o clima exterior é obtido em função da *condutância térmica por convecção* (varia consoante as características do vento e da fachada (vd. Subcapítulo 4.2.3.1)) regista-se uma variação ao longo do ano de referência. No caso do ambiente interior este coeficiente é constante, assumindo o valor aproximado de  $25 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ , pois a *condutância térmica por convecção* para ambiente interior é constante ao longo do ano de referência (vd. Figura 5.11).

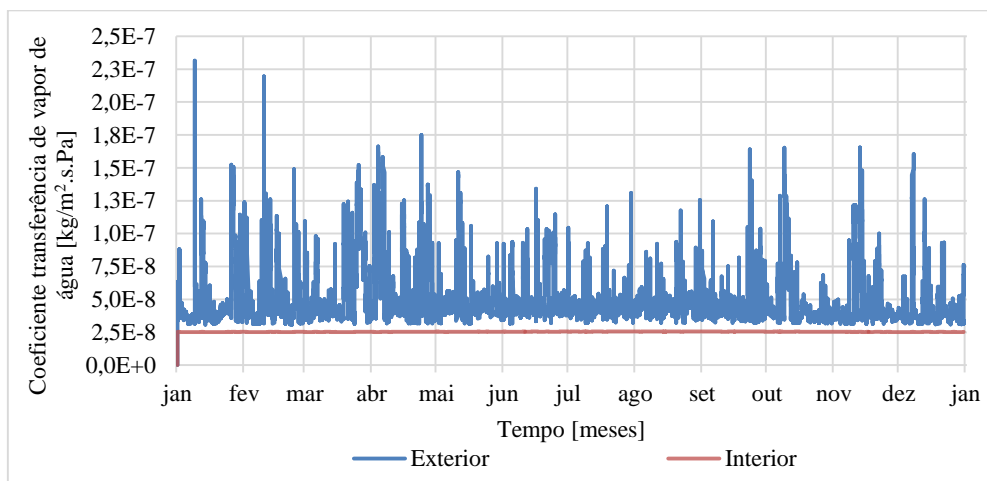


Figura 5.12 – Variação do coeficiente de transferência de vapor para o meio ambiente exterior e interior ao longo do ano de referência. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

Verifica-se que o *coeficiente de transferência de vapor para gradiente de pressão* para ambos os climas possui um valor inicial nulo, uma vez que o ano considerado foi o primeiro ano do período de cálculo. Nas condições iniciais não existem trocas de humidade entre o meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo.

## 5.2. Opções adoptadas nas soluções construtivas adoptadas

O presente subcapítulo apresenta em primeiro lugar a justificação dos *inputs* adoptados nas simulações efectuadas, e as razões pelas quais foram analisadas as soluções construtivas com camada de tijolo maciço. Em segundo lugar é calculada a espessura do isolamento térmico para aplicação pelo interior e pelo exterior de acordo com a regulamentação em vigor de certificação energética de edifícios em Portugal.

### 5.2.1. Inputs adoptados

A presente dissertação aborda o comportamento higrotérmico de soluções construtivas com camada de suporte de tijolo maciço, já que se trata de uma tipologia de paredes utilizada em Portugal entre 1830 e 1960 em edifícios habitacionais [39]. As paredes apresentam espessura a uma vez, a uma vez e meia e a duas vezes, conforme o número de pisos [7], sendo revestidas em ambas as faces ou apenas numa com uma espessura compreendido entre 30 a 50 milímetros ou com face à vista [39].

Em primeiro lugar estudou-se o elemento construtivo com face à vista de modo a averiguar a influência da camada de tijolo maciço, seguindo-se uma análise à influência da espessura desta camada. Em segundo lugar analisou-se a influência da camada de reboco na face exterior, interior e em ambas as faces, tendo este estudo incluído argamassa de cal, de cal e cimento, e de cimento. Por último é analisado a influência da reabilitação térmica pelo interior e pelo exterior em paredes de tijolo maciço.

Uma vez que as alvenarias simples de tijolo maciço foram utilizadas em edifícios habitacionais optou-se por simular as condições do clima interior através de uma carga média de humidade da norma EN 15026:2007 [14]. O edifício a que corresponde cada uma das paredes simulada tem até 10 metros de altura e as paredes encontram-se orientadas a Sudoeste.

Optou-se por não alterar a metodologia de simulação do clima interior, uma vez que esse tipo de análise já foi efectuada, e.g. *Jorne* [24]. A opção pela norma EN 15026:2007 [14] deve-se ao facto de se tratar da metodologia mais condicionante em termos de temperatura interior (vd. Subcapítulo 5.1.1). Em relação à orientação optou-se por Sudoeste, já que se trata da orientação com maior incidência de chuva e de radiação solar numa superfície vertical (vd. Subcapítulo 5.1.2 e 5.1.3).

Relativamente ao *coeficiente de absorção de radiação por onda-curta* da camada de reboco optou-se por não alterar o valor, uma vez que esse tipo de análise já foi efectuado, e.g. *Ribeiro* [37]. Adoptou-se o valor 0,4 que corresponde ao valor característico do reboco e porque se encontra em conformidade com o valor correspondente à cor clara do revestimento exterior na tabela 08 do Despacho (extracto) nº 15793-K/2013 [9].

Optou-se por não alterar os *inputs* mencionados anteriormente de modo a que as condições a que os elementos construtivos se encontram sujeitas sejam as mesmas, possibilitando a comparação entre as várias análises apresentadas ao longo do Capítulo 6.

O período de cálculo admitido depende da constituição do elemento construtivo analisado, logo, varia de simulação para simulação. Este valor depende do ano em que é atingido o equilíbrio dinâmico para o elemento construtivo e para as suas camadas. De notar que um período de cálculo distinto não impossibilita a comparação entre simulações, apenas é necessário garantir que o equilíbrio dinâmico foi atingido anteriormente aos anos comparados.

Os materiais que constituem os elementos construtivos analisados são os materiais existentes na biblioteca do WUFI®, em detrimento de introduzir novos materiais semelhantes aos utilizados em Portugal. Para que o programa funcione na sua planitude, i.e. para que todos os fenómenos higrotérmicos que este consegue simular sejam considerados, é necessário que tanto as propriedades básicas como as propriedades complementares de um material estejam caracterizadas. Porém, enquanto as propriedades básicas são de fácil obtenção na bibliografia disponível, é difícil obter as propriedades complementares, por isso, optou-se por utilizar os materiais existentes na biblioteca do programa.

Nos materiais em que não é necessário conhecer as propriedades complementares, tais como os isolamentos térmicos, também se optou por utilizar os materiais existentes na biblioteca do WUFI®, uma vez que as propriedades básicas têm condicionalismos (e.g. valor da condutibilidade térmica não pode ter em conta o calor consumido pela evaporação). Em grande parte da bibliografia disponível não é referido se estes condicionalismos são tidos em conta, por isso, mais uma vez se optou por utilizar os materiais existentes na biblioteca do WUFI®.

### 5.2.2. Soluções construtivas com isolamento térmico

Uma solução construtiva pode ser sujeita a uma intervenção de reabilitação térmica que consiste na aplicação de um isolamento térmico pelo exterior ou pelo interior, sendo que cada opção tem vantagens e desvantagens. No continente europeu a aplicação do isolamento térmico pelo exterior é normalmente denominada por ETICS.

A aplicação de um isolamento térmico<sup>67</sup> pelo exterior possui as seguintes vantagens: corrige as pontes térmicas [42], logo, minimiza o fenómeno da *termofores*, uma vez que uniformiza a *temperatura superficial exterior* [16]; aumenta a temperatura<sup>68</sup> no interior do elemento construtivo e consequentemente diminui a possibilidade de ocorrência de condensações internas na estação de Inverno<sup>69</sup> [19]; implica que toda a espessura do elemento construtivo contribua para a inércia térmica<sup>70</sup>; e não reduz a área interior dos compartimentos.

A impossibilidade da aplicação do isolamento pelo exterior pode dever-se a inúmeras razões (e.g. fachada com valor histórico), o que conduz à opção de aplicar o isolamento pelo interior. A aplicação do isolamento pelo interior implica: a diminuição da área interior dos compartimentos; a diminuição da inércia térmica do elemento construtivo; a diminuição da temperatura no interior do elemento construtivo, e consequentemente o aumento da possibilidade de ocorrência de condensações internas na estação de Inverno [19].

É importante salientar que segundo *Künzel* [29] é recomendável aplicar medidas de protecção contra a chuva incidente (e.g. reboco exterior com valor de *coeficiente de capilaridade* inferior a  $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  [33]) de modo a diminuir a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo no caso de reabilitação térmica pelo interior. As medidas de protecção contra a chuva incidente devem ser aplicadas em primeiro lugar de modo a que ocorra secagem do elemento construtivo, mas ao mesmo tempo é necessário condicionar a quantidade de humidade proveniente do clima exterior que penetra no elemento construtivo [29]. O isolamento térmico apenas deve ser aplicado após o elemento construtivo ter atingido o equilíbrio dinâmico com as medidas de protecção.

#### 5.2.2.1. Espessura da camada de isolante térmico

O objectivo das soluções construtivas enunciadas no presente subcapítulo é proceder à simulação em regime variável de possíveis reabilitações térmicas que cumpram o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação [6], ou seja, o regulamento de certificação energética dos edifícios em vigor em Portugal. Deste modo a espessura da camada de isolante térmico foi calculada seguindo os pressupostos enumerados neste regulamento.

Uma vez que as simulações efectuadas são referentes ao clima de Lisboa considerou-se a zona climática *Grande Lisboa* de acordo com o NUTS III [8]. A altitude máxima na *Grande Lisboa* é 227 metros [35],

<sup>67</sup> Material com uma condutibilidade térmica inferior a  $0,068 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  e uma resistência térmica superior a  $0,30 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ .

<sup>68</sup> A pressão de saturação de vapor de água é directamente proporcional à temperatura (vd. Subcapítulo 2.2.2.2), logo, como a temperatura aumenta também o valor da pressão de saturação aumenta. O aumento da pressão de saturação implica a diminuição da humidade relativa (vd. Subcapítulo 2.2.2.2), logo, diminui a possibilidade de ocorrência de condensações interiores.

<sup>69</sup> Estação em que a temperatura do meio ambiente interior é superior à temperatura do meio ambiente exterior, logo, o fluxo de calor ocorre no sentido do meio ambiente exterior.

<sup>70</sup> A *massa superficial útil*, que caracteriza a inércia térmica de um edifício, para elementos construtivos sem caixa-de-ar em contacto com o clima exterior e que incluam isolamento térmico, é contabilizada do isolamento térmico até à face interior do elemento construtivo [9].

portanto, corresponde à zona climática de Inverno I1, já que o número de graus-dias para esta altitude é inferior a 1300 °C [8] (vd. Quadro C.1, no Anexo C). Apenas a partir dos 244 metros de altitude é que se considera zona climática I2 na *Grande Lisboa* (vd. Anexo F.3, no Anexo F).

Uma vez que se trata da simulação de elementos construtivos verticais em contacto com o clima exterior de Lisboa (i.e. Portugal continental) de acordo com a Tabela I.01 da Portaria nº 379-A/2015 [34] até 1 de Janeiro de 2016 à zona I1 corresponde um *coeficiente de transmissão térmica de referência*<sup>71</sup> de 0,50 W/m<sup>2</sup>.K. Este valor específico permanece válido após 1 de Janeiro de 2016 [34].

No entanto, a mesma portaria ainda enuncia os valores máximos do *coeficiente de transmissão térmica*, ou seja, o valor mais alto que este coeficiente pode assumir. De notar que caso se considere um elemento construtivo com um *coeficiente de transmissão térmica* próximo destes valores a habitação não vai possuir uma classe energética apreciável. Uma vez que se trata da simulação de elementos construtivos verticais em contacto com o clima exterior de acordo com a tabela I.05A da Portaria nº 379-A/2015 [34] à zona I1 corresponde o valor 1,75 W/m<sup>2</sup>.K. É ainda interessante verificar que a partir de 31 de Dezembro de 2015 a Portaria nº 379-A/2015 [34] deixa de admitir valores máximos para este tipo de elementos construtivos.

#### 5.2.2.1.1. Isolamento pelo interior

Nas intervenções de reabilitação térmica pelo interior simuladas na presente dissertação assumiu-se que a camada de tijolo maciço é rebocada em ambas as faces e parte-se do pressuposto que existe a preservação da constituição do elemento construtivo, ou seja, considera-se que as camadas de reboco permanecem intactas, sendo as intervenções constituídas por um isolamento térmico e uma camada de revestimento.

Em relação ao tipo de isolamento térmico simularam-se os seguintes materiais: poliestireno moldado; lâ mineral; aglomerado de cortiça expandida; e poliestireno extrudido. É possível verificar as propriedades básicas destes materiais no Quadro 5.1.

Em relação à camada de revestimento assumiu-se uma placa de gesso cartonado de 12,5 milímetros de espessura de modo a proteger o isolamento térmico. É possível verificar as propriedades básicas e complementares deste material no Quadro 5.2.

Os valores das propriedades básicas dos materiais que compõem o elemento construtivo, nomeadamente a *condutibilidade térmica*<sup>72</sup>, correspondem aos valores existentes no ITE 50 [38] de modo a que a metodologia de cálculo da espessura do isolamento térmico corresponda à metodologia seguida em Portugal (vd. Quadro C.2, no Anexo C). Os valores referentes à resistência térmica da camada de tijolo maciço foram consultados no ITE 54 [39] (vd. Quadro C.3, no Anexo C).

Uma vez que a variação dos valores da *resistência térmica total* imposta pela alteração do tipo de reboco é reduzida (vd. Quadro C.4, no Anexo C) optou-se por utilizar o reboco de cimento, pois este material apresenta o maior valor de *condutibilidade térmica* e o menor valor de *coeficiente de capilaridade* (vd. Quadro 5.2). Os valores de *resistência térmica superficial exterior e interior* adoptados são os valores preconizados pelo ITE 50 [38].

O cálculo da espessura do isolamento térmico foi efectuado para o valor de *coeficiente de transmissão térmica máximo* e o valor de *coeficiente de transmissão térmica de referência* (vd. Anexo F.2, no Anexo F). Conclui-se que a espessura não deve ser inferior a um centímetro, e é recomendável que seja pelo menos seis centímetros. De notar que estes valores foram arredondados às centésimas de modo a serem compatíveis com as espessuras praticadas no mercado português.

<sup>71</sup> Valor, segundo o REH, que o elemento construtivo deve possuir para que o edifício tenha necessidades quase nulas [6].

<sup>72</sup> Recorre-se à *condutibilidade térmica* dos materiais que compõem o elemento construtivo para calcular a resistência térmica do material, e consequentemente, a espessura do isolamento térmico.

Os valores de *coeficiente de transmissão térmica* máximo e de referência para soluções construtivas rebocadas em ambas as faces com argamassa de cimento para a camada de tijolo maciço a 1 ½ vez e a 2 vezes também foram calculados (vd. Quadro C.5, no Anexo C).

Um isolamento térmico com seis centímetros de espessura é um valor elevado para Lisboa, principalmente para um sistema de isolamento pelo interior, por isso optou-se por uma espessura de quatro centímetros de isolamento. Um elemento construtivo com esta espessura apresenta resultados bastante vantajosos (vd. Quadro C.6, no Anexo C), e enquadra-se na gama de espessuras praticadas em Portugal [42].

Nas soluções construtivas com reboco de cal e com reboco de cal e cimento caso se aplique um isolamento térmico pelo interior de acordo com *Künzel* [33] é recomendável substituir a camada de revestimento exterior de modo a que o *coeficiente de capilaridade* do material em contacto com o clima exterior seja inferior a  $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  (i.e.  $0,0083 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ ).

#### 5.2.2.1.2. Isolamento pelo exterior

Nas intervenções de reabilitação térmica pelo exterior também se assumiu que a camada de tijolo é rebocada em ambas as faces e considerou-se que existe preservação da constituição do elemento construtivo, sendo essas intervenções constituídas por uma camada de revestimento e um isolamento térmico.

Em relação à camada de revestimento assumiu-se um reboco do tipo sintético com uma espessura de dois milímetros denominado *Resin Finishing Coat (acrylic stucco)*. É possível verificar as propriedades básicas e complementares deste material no Quadro 5.2.

Em relação ao tipo de isolamento térmico simularam-se os seguintes materiais: poliestireno moldado; e poliestireno extrudido. Uma vez que a *resistência térmica* da camada de reboco sintético é bastante reduzida<sup>73</sup> esta camada não influencia significativamente a *resistência térmica* do elemento construtivo, portanto, a situação é muito semelhante à do isolamento pelo interior (vd. Quadro C.6 e Quadro C.7, no Anexo C), pelo que se adoptou também uma espessura de quatro centímetros para a camada de isolamento térmico. É possível verificar as propriedades básicas destes materiais no Quadro 5.1.

### 5.3. Propriedades dos materiais que compõem os elementos construtivos simulados

As propriedades básicas e complementares dos materiais que compõem os elementos construtivos simulados podem ser consultadas no Quadro 5.1 e no Quadro 5.2.

Os materiais expostos no Quadro 5.1 não apresentam as propriedades complementares, uma vez que não é necessário considerá-las. Contudo, é importante lembrar que o WUFI® atribui automaticamente a qualquer material uma curva de armazenamento de humidade, caso esta não seja definida (vd. Subcapítulo 4.1.2.1.2).

O isolamento de poliestireno expandido de acordo com o programa de cálculo WUFI® é composto por uma camada núcleo (i.e. *XPS core*) e duas camadas superficiais (i.e. *XPS Surface Skin*). As camadas superficiais têm um centímetro de espessura e resultam do processo de fabrico deste tipo de material. Contudo, optou-se por não considerar as camadas superficiais uma vez que as propriedades básicas (vd. Quadro C.8, no Anexo C), nomeadamente o *factor de resistência à difusão de vapor*, são muito superiores às propriedades dos poliestirenos expandidos utilizados em Portugal.

---

<sup>73</sup> Devido à sua diminuta espessura.



Quadro 5.1 – Propriedades básicas dos isolamentos térmicos utilizados nas simulações efectuadas na presente dissertação

Tipo de propriedades	Propriedades	Unidades	Materiais - Isolamentos			
			Lã Mineral	Poliestireno moldado	Poliestireno expandido	Aglomerado de cortiça expandido
Básicas	Massa volúmica [ $\rho$ ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	60,0	15,0	40,0	150,0
	Porosidade [ $\Psi$ ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,95	0,95	0,95	0,90
	Calor específico do material seco [ $c_s$ ]	[J/kg.K]	850,0	1500,0	1500,0	1880,0
	Condutibilidade térmica do material seco [ $\lambda_0$ ]	[W/m.K]	0,040	0,040	0,030	0,040
	Factor de resistência à difusão de vapor [ $\mu$ ]	[-]	1,3	30,0	100,0	10,0

Quadro 5.2 – Propriedades básicas e complementares dos materiais utilizados nas simulações efectuadas na presente dissertação

Tipo de propriedades	Propriedades	Unidades	Materiais					
			Tijolo maciço cerâmico	Argamassas				Gesso cartonado
				Cal	Cal e cimento	Cimento	Sintética	
Básicas	Massa volúmica [ $\rho$ ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	1900,0	1600,0	1900,0	2000,0	1100,0	850,0
	Porosidade [ $\Psi$ ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0,24	0,30	0,24	0,30	0,12	0,65
	Calor específico do material seco [ $c_s$ ]	[J/kg.K]	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0
	Condutibilidade térmica do material seco [ $\lambda_0$ ]	[W/m.K]	0,60	0,70	0,80	1,20	0,70	0,20
	Factor de resistência à difusão de vapor [ $\mu$ ]	[-]	10,0	7,0	19,0	25,0	1000,0	8,3
Complementares	Teor de água de referência [ $w_{80}$ ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	18,0	30,0	45,0	35,0	10,0	-
	Teor de água de saturação [ $w_{sat}$ ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	190,0	250,0	210,0	280,0	100,0	-
	Suplemento de condutibilidade térmica [ $b$ ]	[%/M.-%]	15,0	8,0	8,0	10,0	-	8,0
	Coefficiente de capilaridade [ $A$ ]	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]	0,1100	0,0470	0,0170	0,0076	0,0013	-



## 6. SIMULAÇÕES EM PAREDES SIMPLES DE ALVENARIA DE TIJOLO MACIÇO

Efectuou-se duas simulações para cada solução construtiva proposta e introduziram-se os mesmos *inputs* à excepção do *factor de absorção de chuva incidente*. Na primeira simulação adoptou-se o valor 0,7 (vd. Subcapítulo 4.2.3.5) e na segunda o valor zero. Com os resultados obtidos a partir da primeira simulação analisou-se o comportamento higrotérmico da solução construtiva, e a partir da comparação entre os resultados obtidos da primeira e da segunda simulação determinou-se a influência da chuva incidente na solução construtiva.

Os resultados analisados são os seguintes:

- *Teor de água*: valores médios referentes a cada camada do elemento construtivo. Os resultados são apresentados em  $\text{kg/m}^3$ ;
- *Fluxo de calor*: trocas de calor efectuadas entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo. Os fluxos de calor apresentados não têm em conta o calor latente devido à mudança de fase [43]. Os resultados são apresentados em  $\text{W/m}^2$ ;
- *Fluxo de humidade*: trocas de humidade efectuadas entre um meio ambiente e o respectivo paramento do elemento construtivo. Existem três tipos: fluxo de humidade, fluxo capilar e fluxo de difusão. Os resultados são apresentados em  $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ;
- *Temperatura, Humidade relativa e Pressão parcial de vapor de água*: são referentes aos pontos de monitorização adoptados. Os resultados são apresentados em  $^{\circ}\text{C}$ , % e Pa, respectivamente.

O transporte de humidade na fase gasosa denomina-se fluxo de difusão e na fase líquida denomina-se fluxo capilar. A soma destes dois fluxos denomina-se fluxo de humidade, que depende das condições dos climas fronteira, já que proporcionam trocas de humidade entre o clima e o elemento construtivo.

O fluxo de humidade e o fluxo de calor referente ao clima exterior ocorrem no sentido do meio ambiente, caso o valor seja negativo, e no sentido inverso (i.e. do meio ambiente para o elemento construtivo) caso o valor seja positivo. No clima interior quando o valor do fluxo é positivo ocorre no sentido do meio ambiente, e quando é negativo ocorre no sentido do elemento construtivo.

Foi atribuída a denominação de *caso de estudo padrão* à parede aparente de tijolo maciço a uma vez de modo a ser utilizada como referência às várias análises apresentadas no presente trabalho.

### 6.1. Estudo sobre a influência da camada de tijolo maciço e a importância da chuva incidente

O presente subcapítulo tem como objectivo analisar a importância da camada de tijolo maciço numa parede simples de alvenaria de tijolo maciço e quantificar a influência da chuva incidente nessa camada. Para tal, foram construídos três casos de estudo, em que a única alteração introduzida foi o aumento da espessura da camada de tijolo maciço (vd. Quadro 6.1).

Em primeiro lugar é apresentada uma análise comparativa entre os resultados obtidos das simulações com e sem chuva incidente de uma parede de tijolo maciço a uma vez de modo a quantificar a influência da chuva incidente. Em segundo lugar são comparados os resultados obtidos para as paredes de tijolo maciço a uma vez, a uma vez e meia, e a duas vezes de modo a perceber qual a influência da espessura da camada de tijolo e a respectiva influência da chuva incidente.

Os *inputs* para a simulação com camada de tijolo maciço a uma vez são apresentados no Quadro D.1 do Anexo D. As simulações com camada de tijolo maciço a uma vez e meia, e a duas vezes têm os mesmos *inputs* que a simulação com camada de tijolo maciço a uma vez apenas diferindo na espessura.

Foi atribuída a denominação C/WDR às simulações em que é considerada a chuva incidente, e S/WDR às simulações em que não se considera a chuva incidente. Estas denominações apenas são utilizadas quando na mesma figura é apresentada a variação de um conceito referente a ambas as simulações.

O período de cálculo adoptado foi de 1 de Janeiro de 2015 a 1 de Janeiro de 2020. Contudo, existem ocasiões em que se opta por fazer referência a um intervalo de tempo específico, de 1 de Janeiro de 2018 a 1 de Janeiro de 2019, i.e. quarto ano do período de cálculo. Esta opção é válida, uma vez que o equilíbrio dinâmico foi atingido anteriormente a este intervalo temporal. Ao ser atingido o equilíbrio dinâmico a variação de qualquer parâmetro passa a ser idêntica para todos os anos posteriores.

Quadro 6.1 – Especificações importantes para as simulações efectuadas com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço

Caso de estudo	Constituição	Espessura	$S_{d,Total}^{74}$	Relação entre $S_d^{75}$	$A^{76}$
		[m]	[m]	[%]	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]
1	Tijolo maciço	0,220	2,20	-	0,1100
2	Tijolo maciço	0,340	3,40	54,5%	
3	Tijolo maciço	0,450	4,50	104,5%	

### 6.1.1. Análise ao teor de água

#### 6.1.1.1. Estudo da parede de alvenaria tijolo maciço a uma vez

A quantidade de humidade no interior do elemento construtivo é fortemente influenciada pela quantidade de humidade proveniente do clima exterior (vd. Figura 6.1). Enquanto o teor de água para a simulação com chuva incidente tem como mínimo 5,32 kg/m<sup>3</sup> e máximo 137,75 kg/m<sup>3</sup>, para a simulação sem chuva incidente o mínimo é 4,23 kg/m<sup>3</sup> e o máximo é 18,00 kg/m<sup>3</sup> (que corresponde ao teor de água inicial). É possível concluir que existe uma diferença muito significativa caso a chuva incidente não seja considerada, o que demonstra o elevado peso que este conceito possui relativamente à quantidade de humidade no interior deste elemento construtivo.

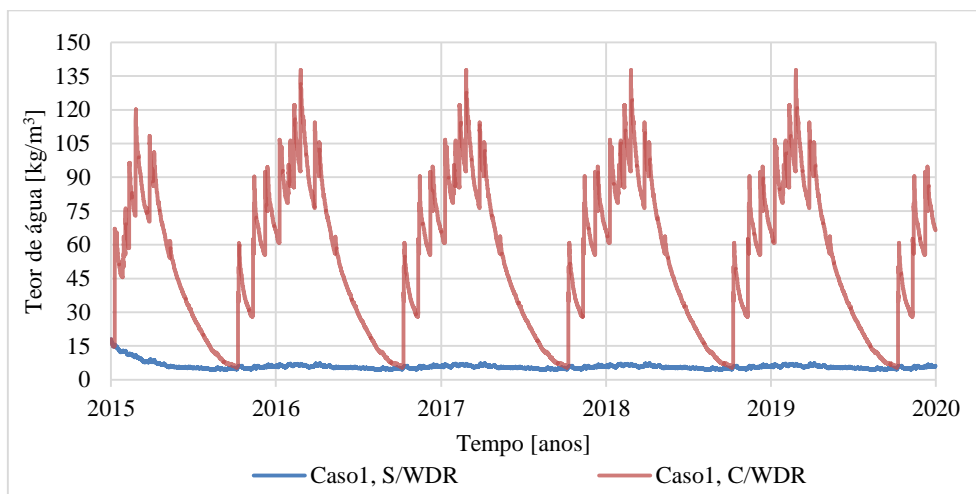


Figura 6.1 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço das simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

A partir da Figura 6.1 constata-se que qualquer ano do período de cálculo é composto por um ciclo de humedecimento e secagem do elemento construtivo. É possível repartir um ano em três fases (vd. Figura 6.2): primeira fase de humedecimento (i.e. *wetting*), entre o mês de Janeiro e o mês de Fevereiro, em que existe um aumento gradual do teor de água; fase de secagem (i.e. *drying*), entre o mês de Março e

<sup>74</sup> Espessura da camada de ar de difusão equivalente do elemento construtivo.

<sup>75</sup> Aumento da espessura da camada de ar de difusão equivalente do elemento construtivo em relação à do caso estudo padrão.

<sup>76</sup> Corresponde à camada do elemento construtivo em contacto directo com o clima exterior.

o início do mês de Outubro, em que existe uma diminuição acentuada do teor de água; segunda fase de humedecimento (i.e. *wetting*), entre o início do mês de Outubro e o final do mês de Dezembro, em que o valor de teor de água aumenta. É interessante verificar que entre o final do mês de Março e o início do mês de Abril ocorre um aumento do teor de água devido à chuva incidente, no entanto, é um intervalo de tempo reduzido, sendo de seguida retomada a fase de secagem.

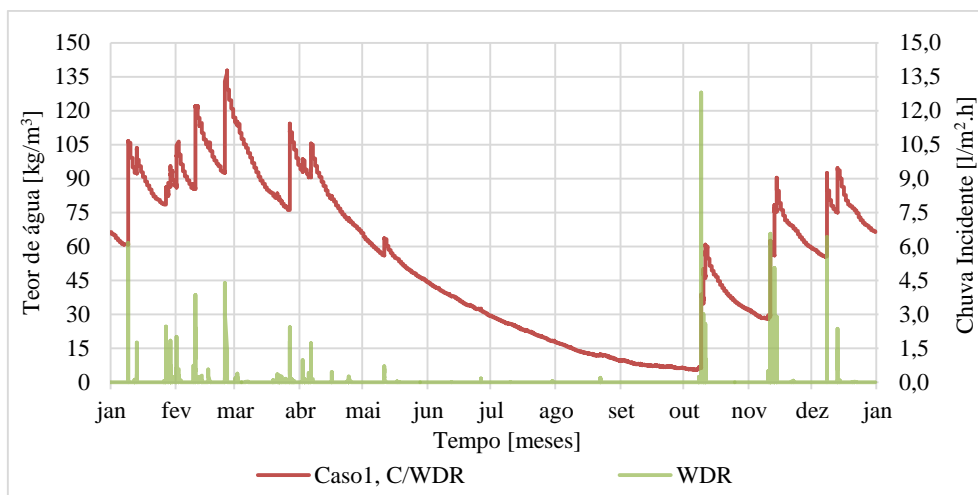


Figura 6.2 – Variação do teor de água para a simulação com chuva incidente e o perfil da chuva incidente. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

A partir da Figura 6.2 verifica-se que os aumentos do teor de água coincidem com a incidência de chuva na superfície exterior do elemento construtivo. Esta coincidência demonstra a enorme importância da chuva incidente na quantidade de humidade no interior deste elemento construtivo, e permite afirmar que a fase de humedecimento está associada à precipitação e que a fase de secagem à sua ausência.

Como exemplo, considera-se o dia 25 de Fevereiro de 2018 às duas horas da manhã, que corresponde à data no quarto ano do período de cálculo em que se obtém o maior valor de teor de água para a simulação com chuva incidente, aproximadamente  $137,75 \text{ Kg/m}^3$ . Na mesma data, para a simulação sem chuva incidente, este valor é aproximadamente  $7,11 \text{ kg/m}^3$ . A diferença entre estes valores é aproximadamente  $130 \text{ kg/m}^3$  (i.e. diferença na ordem dos 95%), um valor bastante elevado, que demonstra a importância da chuva incidente neste caso específico. Contudo, constatou-se que a chuva incidente não possui sempre a mesma influência, ou seja, a diferença entre os valores de teor de água variam ao longo de cada ano do período de cálculo (vd. Figura 6.3), já que a quantidade de humidade para a simulação com chuva incidente varia significativamente ao longo do mesmo período de tempo.

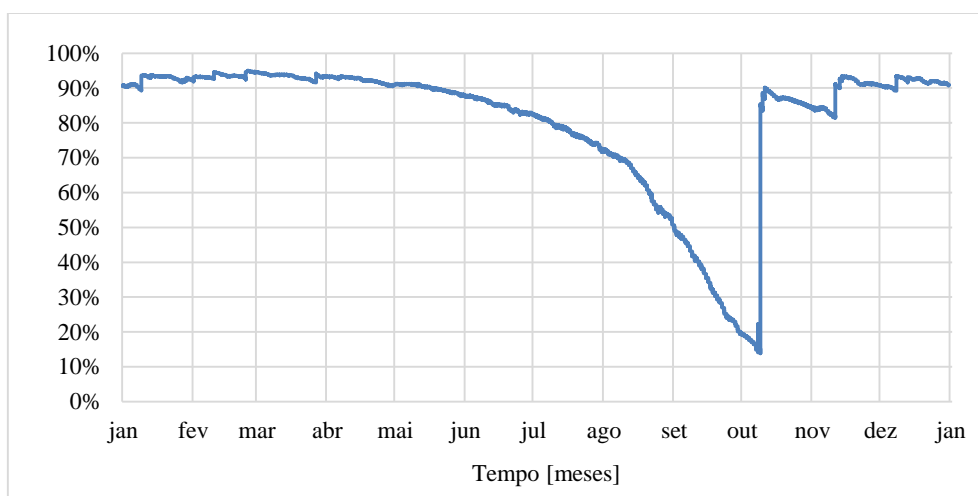


Figura 6.3 – Diferença, em percentagem, do teor de água das simulações com e sem chuva incidente

A Figura 6.3 apresenta a diferença<sup>77</sup>, em percentagem, entre o teor de água das simulações com e sem chuva incidente. Verifica-se que a diferença entre os valores de teor de água atinge valores elevados, em alguns casos são atingidos valores superiores a 90%, demonstrando o elevado contributo da chuva incidente. Constata-se também que entre os meses de Março e Outubro a diferença diminui muito significativamente. Esta diminuição deve-se à redução do teor de água para as simulações com chuva incidente neste intervalo de tempo, causada pela alteração das condições dos climas fronteira. O andamento da diferença de teor de água é distinto entre os anos anteriores e os anos posteriores ao equilíbrio dinâmico. Neste caso o equilíbrio dinâmico foi atingido no segundo ano do período de cálculo.

#### 6.1.1.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo

O aumento de espessura da camada de tijolo implica uma diminuição dos valores atingidos nas fases de humedecimento e um aumento dos valores atingidos na fase de secagem do elemento construtivo, portanto, existe uma variação menos pronunciada do teor de água (vd. Figura 6.4). Uma vez que não se alterou o *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima exterior a variação menos pronunciada deve-se ao aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* resultante do aumento da espessura (vd. Quadro 6.1). Quando maior for a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* menor será o fluxo de difusão de vapor de água que atravessa uma camada (vd. Equação 2.20). É por esta razão que, durante a fase de humedecimento, quanto maior a espessura do elemento construtivo menores são os valores de teor de água atingidos. Contudo, durante a fase de secagem a humidade que se encontra no interior do elemento tem maior dificuldade em atingir os climas fronteiras à medida que aumenta a espessura, uma vez tem de percorrer uma distância maior [20], é por esta razão, que na fase de secagem quanto maior a espessura, maior será o valor mínimo atingido de teor de água.

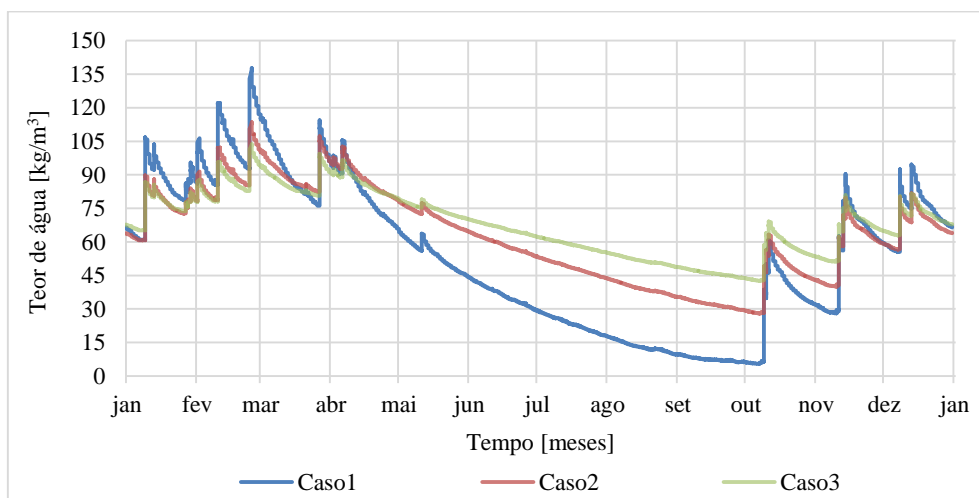


Figura 6.4 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

O aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* implica um menor fluxo de difusão, portanto, existe uma menor quantidade de humidade no interior do elemento construtivo na fase de humedecimento do elemento construtivo. Contudo, a diminuição da quantidade de humidade implica menores coeficientes de transporte de água líquida na próxima iteração (vd. Subcapítulo 4.1.2.2), e por isso, uma menor quantidade de humidade na fase líquida (vd. Subcapítulo 2.2.1.2), logo, uma menor quantidade de humidade. É por esta razão que aumentar apenas a espessura causa uma alteração tão significativa da variação do teor de água.

<sup>77</sup> A diferença em percentagem foi calculada recorrendo à seguinte equação:  $\% = \left[ 1 - \frac{w_{sem,WDR}}{w_{com,WDR}} \right] \times 100$

A importância da chuva incidente varia consoante a espessura do elemento construtivo, e de forma a entender como ocorre essa variação foi efectuada uma comparação entre a importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos três casos de estudo. A partir da Figura 6.5 constata-se que com o aumento da espessura a variação da diferença entre os valores de teor de água diminui e a fase de secagem do elemento construtivo tende a desaparecer.

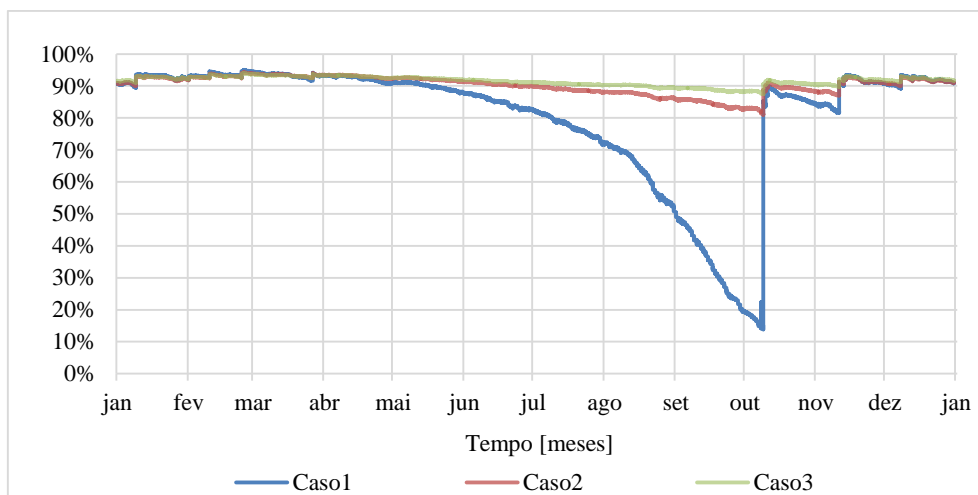


Figura 6.5 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

Enquanto no primeiro caso é visível um decréscimo acentuado na fase de secagem, no segundo caso esse decréscimo é mais reduzido comparativamente, diminuindo à medida que a espessura aumenta. Conclui-se que com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço a chuva incidente ganha importância, mais evidente no período de secagem do elemento construtivo, e tem um elevado contributo para a quantidade de humidade existente no interior destes elementos construtivos (vd. Quadro 6.2).

Quadro 6.2 – Diferença mínima e máxima atingida ao longo do quarto ano do período de cálculo para os três casos de estudo

Diferença	Caso de estudo		
	1	2	3
Mínimo	14%	81%	87%
Máximo	95%	94%	94%

## 6.1.2. Análise ao fluxo de calor

### 6.1.2.1. Estudo de parede simples de alvenaria de tijolo maciço a uma vez

A partir da Figura 6.6 constata-se que a chuva incidente é responsável pela diminuição da *temperatura superficial exterior*, mais pronunciada entre os meses de Janeiro e Abril e os meses de Outubro e Dezembro. Inicialmente poder-se-ia considerar que a chuva incidente seria responsável pelo aumento da *temperatura superficial exterior*, já que o valor da *condutibilidade térmica* depende da quantidade de humidade no interior de um elemento construtivo. No entanto, a *temperatura superficial exterior* não depende apenas da transmissão de calor através do elemento construtivo, logo, esta noção inicial encontra-se incompleta.

A chuva incidente é a principal responsável pela condução capilar que ocorre num elemento construtivo e é este mecanismo de transporte de humidade que implica a diminuição da *temperatura superficial exterior*, em parte porque provoca um aumento do valor do fluxo de difusão de vapor de água, logo, a

evaporação ganha importância. Este aumento não é igual ao longo do ano, uma vez que a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo também varia ao longo do ano (vd. Figura 6.2). Nos meses em que a quantidade de humidade é menor, a diferença de temperatura entre as simulações é menor, portanto, a diferença entre os fluxos das simulações vai ser menor.

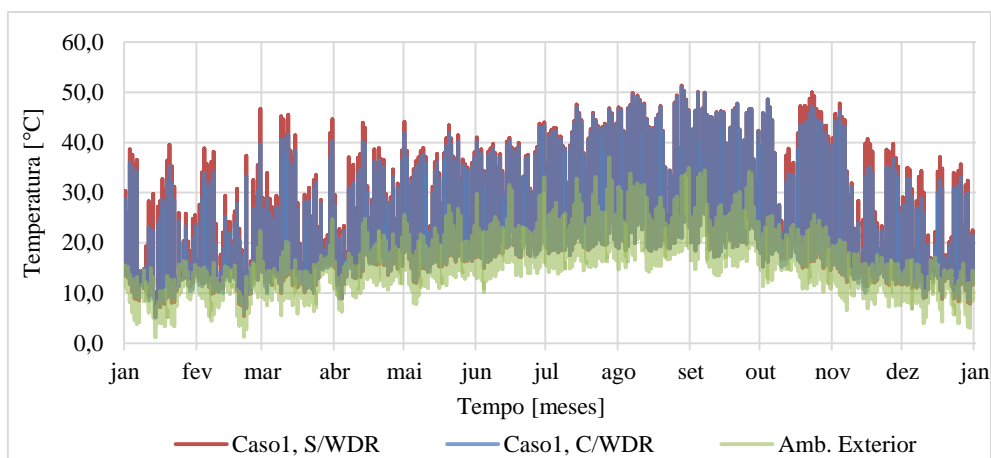


Figura 6.6 – Variação da temperatura do paramento exterior para as simulações sem e com chuva incidente, e da temperatura do meio ambiente exterior. Tons de azul ou verde forte são indicativos de sobreposição

A *temperatura superficial exterior* para a simulação com chuva incidente é superior à temperatura do meio ambiente exterior, o que implica um fluxo negativo, uma vez que as trocas ocorrem no sentido do ambiente (vd. Subcapítulo 2.1.2). Já que a temperatura para a simulação sem chuva incidente é mais elevada que a temperatura da simulação com chuva incidente, o diferencial de temperatura entre o meio ambiente e o paramento aumenta, o que implica um fluxo de calor maior (vd. Figura 6.7). Quer isto dizer que a chuva incidente é responsável pela diminuição das trocas de calor no clima exterior, mais pronunciada entre os meses de Janeiro e Abril e os meses de Outubro e Dezembro.

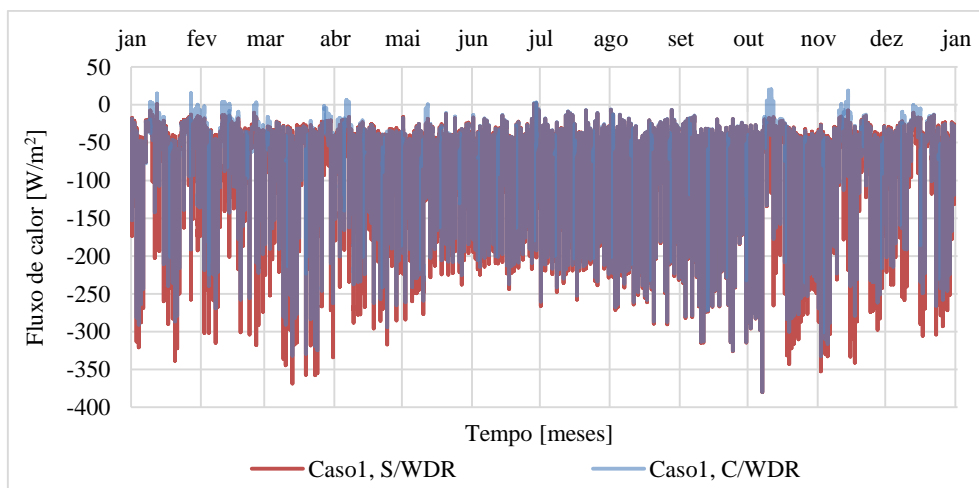


Figura 6.7 – Variação do fluxo de calor entre meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações sem e com chuva incidente. Tons de azul forte são indicativos de sobreposição

As trocas de calor entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo variam consoante se considere ou não a chuva incidente. A partir da Figura 6.8 é perceptível que a chuva incidente é responsável pela diminuição da *temperatura superficial interior*. Esta diminuição é mais pronunciada entre os meses de Janeiro e Maio e os meses de Outubro e Dezembro, uma vez que se trata do intervalo de tempo em que o elemento construtivo possui maior quantidade de humidade no seu interior (vd. Figura 6.2). Entre os meses de Junho e Setembro a diferença da *temperatura superficial interior* é pouco significativa, uma vez que neste intervalo de tempo a diferença entre a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo para ambas as simulações é reduzida e tendem a



aproximar-se (vd. Figura 6.2). É possível concluir que a chuva incidente é responsável pela diminuição da *temperatura superficial interior* do elemento construtivo.

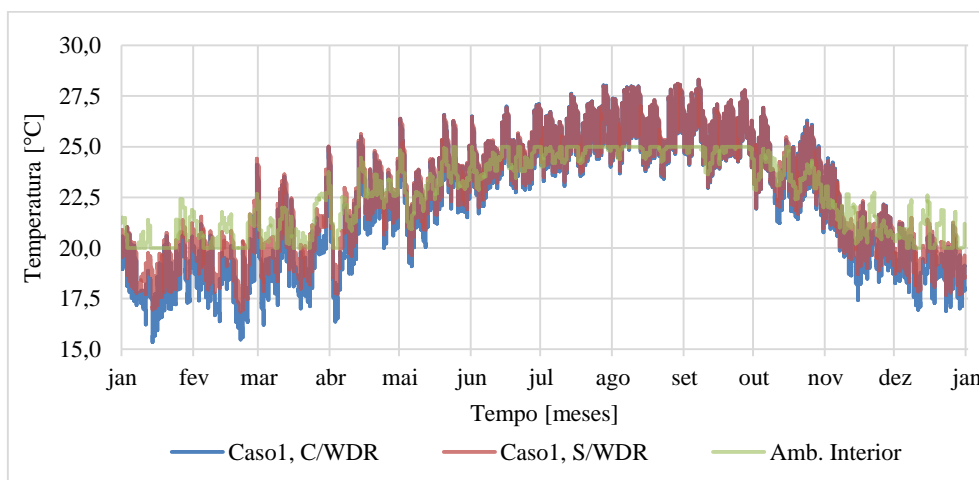


Figura 6.8 – Variação da temperatura do paramento interior para as simulações com e sem chuva incidente, e da temperatura do meio ambiente interior. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

Ao não contabilizar a chuva incidente, o valor da *condutibilidade térmica*, que depende do teor de água, não possui um aumento tão significativo, quer isto dizer que o meio ambiente interior não perde tanto calor para o elemento construtivo e por isso a *temperatura superficial interior* é superior (vd. Equação 2.11). Uma vez que a chuva incidente é responsável pela diminuição da *temperatura superficial interior*, também é responsável pelo aumento do fluxo de calor interior (vd. Figura 6.9), já que os valores da temperatura do paramento distam mais dos valores da temperatura do meio ambiente interior.

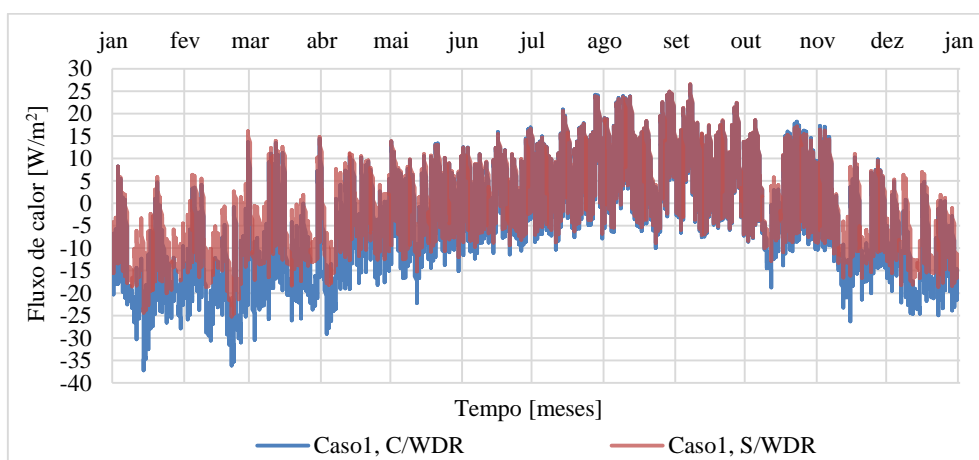


Figura 6.9 – Variação do fluxo de calor entre meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente. Tons vermelho forte são indicativos de sobreposição

#### 6.1.2.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo

No presente subcapítulo pretende-se em primeiro lugar demonstrar qual o efeito do aumento da espessura da camada de tijolo maciço nas trocas de calor do clima exterior e do clima interior. Em segundo lugar pretende-se quantificar a diferença entre os fluxos totais de calor das simulações com e sem chuva incidente, e de que forma esses valores variam consoante o aumento da espessura.

A partir da Figura 6.10 verifica-se que o fluxo de calor referente ao clima exterior diminui ligeiramente com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço. Esta diferenciação deve-se ao aumento da *resistência térmica* e da *resistência de difusão ao vapor de água* causado pelo aumento da espessura do

elemento construtivo, que implica um menor valor de temperatura e pressão parcial de vapor de água no paramento exterior em condições de Inverno, e por isso existe uma aproximação à temperatura do meio ambiente exterior, o que implica uma diminuição do fluxo de calor exterior. A diminuição do fluxo de calor é menos acentuada entre os meses de Maio e Outubro, já que os valores da temperatura do paramento exterior para os três casos de estudo neste intervalo de tempo são mais próximos.

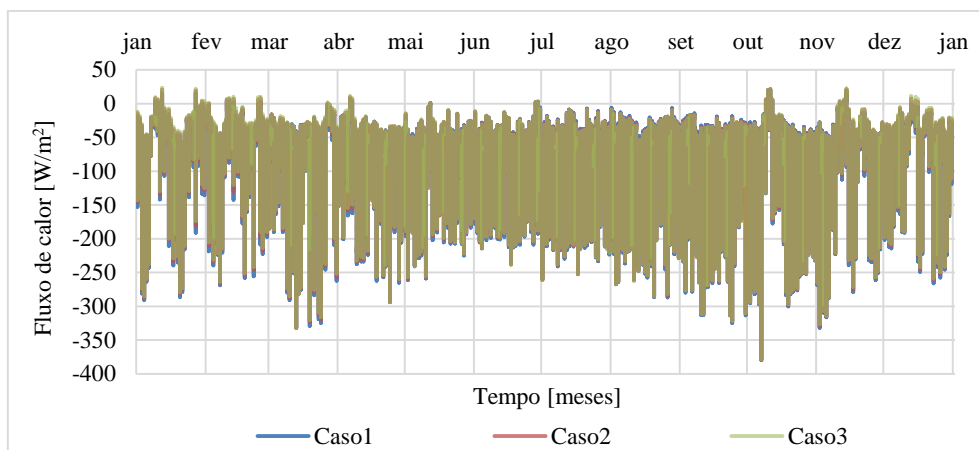


Figura 6.10 – Variação do fluxo de calor entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

A variação do fluxo de calor entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo torna-se menos pronunciada com o aumento da espessura (vd. Figura 6.11). Verifica-se ainda que o fluxo de calor entre os meses de Maio e Outubro é maioritariamente positivo, querendo isto dizer que o valor da temperatura do meio ambiente interior é inferior ao valor da temperatura do paramento, e portanto, o fluxo de calor ocorre no sentido do meio ambiente interior. No resto do ano a situação inverte-se e o fluxo de calor ocorre maioritariamente no sentido do paramento interior do elemento construtivo.

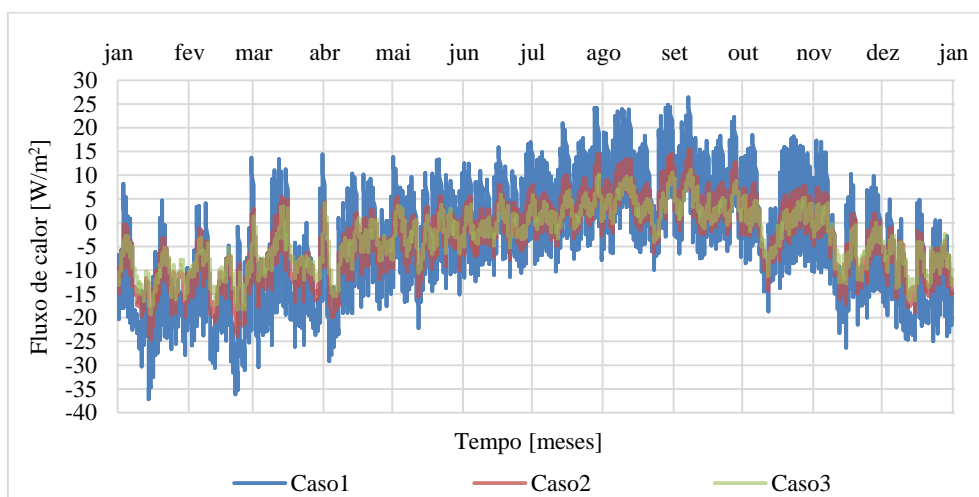


Figura 6.11 – Variação do fluxo de calor entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

Ao comparar a variação das trocas de calor referentes ao clima exterior e ao clima interior verifica-se uma diferença muito acentuada entre os valores atingidos por ambos os fluxos, mais concretamente no fluxo negativo. Enquanto os fluxos de calor referentes ao clima exterior variam entre  $-379,66 \text{ W/m}^2$  e  $23,62 \text{ W/m}^2$  os fluxos de calor referentes ao clima interior variam entre  $-37,21 \text{ W/m}^2$  e  $26,42 \text{ W/m}^2$ .

Em ambos os climas um fluxo negativo implica que as trocas de calor ocorrem do interior para o exterior, contudo, no clima exterior este sentido implica que *temperatura superficial exterior* é superior à

temperatura do meio ambiente. Este facto deve-se ao contributo da radiação solar e ao valor do *factor de absorção de radiação de onda-curta* de uma alvenaria de tijolo aparente, que implica que grande parte da radiação solar incidente é absorvida, e por isso, existe um elevado fluxo de calor exterior.

De modo a ter uma noção das trocas de calor que ocorrem durante um ano após ser atingido o equilíbrio dinâmico foram somados os valores de fluxo de calor referentes para cada ano do período de cálculo consoante o clima, o caso de estudo e a simulação (i.e. com e sem chuva incidente). Os resultados<sup>78</sup> obtidos em relação ao quarto ano do período de cálculo são apresentados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Fluxo de calor para as simulações com e sem chuva incidente, e respectiva diferença para clima exterior e interior em relação ao quarto ano do período de cálculo

Caso de Estudo	Fluxo de calor [MJ/m <sup>2</sup> ]					
	Clima exterior			Clima interior		
	C/WDR	S/WDR	Diferença	C/WDR	S/WDR	Diferença
1	-2,35	-2,53	-7,3%	-0,18	-0,07	59,2%
2	-2,31	-2,51	-8,4%	-0,13	-0,05	59,3%
3	-2,29	-2,50	-9,0%	-0,11	-0,04	59,7%

No clima exterior, com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço, verifica-se uma diminuição do valor absoluto de fluxo de calor em ambas as simulações e um aumento da influência da chuva, já que a diferença entre os fluxos aumenta. No clima interior, com o aumento da espessura, também se verifica uma diminuição do valor absoluto do fluxo de calor em ambas as simulações e um aumento da influência da chuva.

Da comparação dos resultados obtidos para ambos os climas constata-se que a chuva incidente influencia mais as trocas de calor referentes ao clima interior, já que para as simulações com chuva incidente as trocas no clima exterior são muito superiores às trocas no clima interior (e.g. para o primeiro caso de estudo a diferença é aproximadamente -2,20 MJ/m<sup>2</sup>, ou seja, as trocas no clima exterior são 13,4 vezes superiores às que ocorrem no clima interior). Contudo, para ambos os climas o aumento da espessura da camada de tijolo maciço implica uma diminuição do valor absoluto das trocas de calor.

### 6.1.3. Análise ao fluxo de humidade

#### 6.1.3.1. Estudo de parede simples de alvenaria de tijolo maciço a uma vez

A Figura 6.12 apresenta a variação do fluxo de humidade referente ao clima exterior para as simulações com e sem chuva incidente. A partir da comparação dos valores de ambas as simulações é visível o importante contributo da chuva incidente nas trocas de humidade no clima exterior. É ainda visível que o fluxo de humidade possui valores positivos mais elevados que os negativos, logo, existe uma maior quantidade de humidade a entrar no elemento construtivo que a sair. Esta predominância deve-se à influência da chuva incidente, já que a água ao incidir no paramento exterior penetra no elemento construtivo, logo, o fluxo de humidade é positivo.

De modo a quantificar as trocas de humidade que ocorrem durante um ano após ser atingido o equilíbrio dinâmico foram somados respectivamente os valores dos fluxos de humidade, de difusão e capilar consoante o ano do período de cálculo, obtendo desta forma os respectivos fluxos anuais<sup>79</sup> para os três tipos de fluxo (vd. Quadro E.1, no Anexo E.1). A partir destes valores constatou-se que após ter sido

<sup>78</sup> O sinal negativo, na coluna das diferenças, está associado a um aumento do fluxo de calor da simulação com chuva incidente para a simulação sem chuva incidente e evidencia que a chuva incidente é responsável pela diminuição do fluxo de calor. O sinal positivo está associado a uma diminuição do fluxo de calor e evidencia que a chuva incidente é responsável pelo aumento do fluxo de calor.

<sup>79</sup> Uma vez que o sinal apenas indica o sentido do fluxo consideraram-se os resultados obtidos em valores absolutos.

atingido o equilíbrio dinâmico<sup>80</sup>, o valor do fluxo capilar exterior anual diminui e o valor de fluxo de difusão exterior anual aumenta em relação ao primeiro ano do período de cálculo. Relativamente ao fluxo de humidade exterior anual ocorre uma diminuição, após ter sido atingido o equilíbrio dinâmico, e o sentido é idêntico ao do fluxo capilar, i.e. do meio ambiente para o paramento, uma vez que o fluxo capilar é superior ao fluxo de difusão.

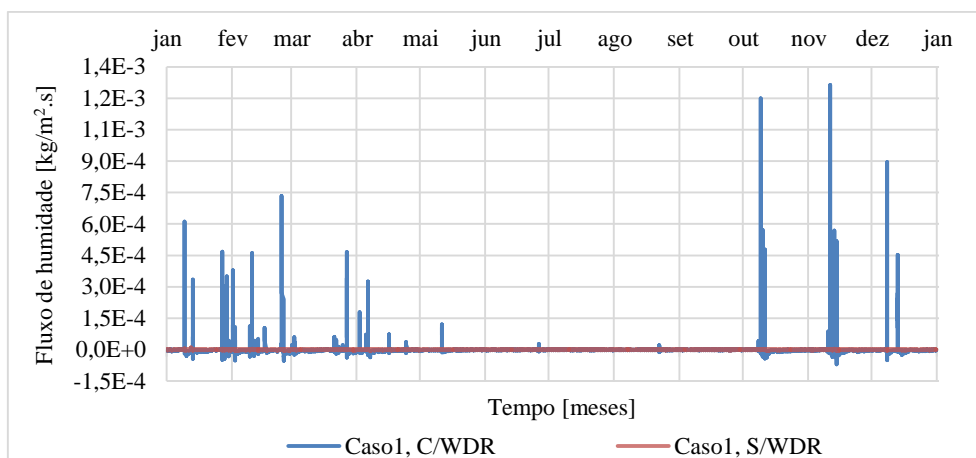


Figura 6.12 – Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

O mesmo procedimento das simulações com chuva incidente foi efectuado para as simulações sem chuva incidente em relação ao fluxo de humidade, de difusão e capilar. Contudo, como o fluxo capilar é nulo, o fluxo de humidade partilha do mesmo sentido e do mesmo valor que o fluxo de difusão. A partir dos valores obtidos constatou-se que após ter sido atingido o equilíbrio dinâmico o fluxo de humidade exterior anual diminui em relação ao ano anterior e ocorre no sentido do meio ambiente (vd. Quadro E.2, no Anexo E.1).

A diferença entre os valores do fluxo de humidade das duas simulações para o quarto ano do período de cálculo é aproximadamente  $17,83 \text{ kg/m}^3$  (uma diferença na ordem dos 97%) um valor bastante elevado que demonstra a importância da chuva incidente nas trocas de humidade entre o meio ambiente exterior e o respectivo paramento do elemento construtivo.

Uma vez que o fluxo de humidade é igual à soma do fluxo de difusão e do fluxo capilar, de seguida são apresentados estes fluxos ao longo do quarto ano do período de cálculo para ambas as simulações, de modo a quantificar a importância de cada tipo de fluxo no transporte de humidade.

A Figura 6.13 apresenta a variação do fluxo de difusão exterior para as simulações com e sem chuva incidente ao longo do quarto ano do período de cálculo. A partir desta figura verifica-se: que a variação do fluxo de difusão é mais pronunciada durante a fase de humedecimento e que ocorre maioritariamente no sentido do meio ambiente exterior, já que possui sinal negativo; e que a chuva incidente influencia o fluxo de difusão, de forma distinta ao longo do período de cálculo.

O fluxo de difusão é mais pronunciado durante os meses de Janeiro e Abril e os meses de Outubro e Dezembro, uma vez que é nestes intervalos de tempo que existe uma maior quantidade de humidade na fase gasosa e na fase líquida no elemento construtivo. Uma maior quantidade de humidade na fase gasosa implica uma maior pressão parcial, logo, um maior fluxo de difusão (vd. Equação 2.25). Daí que seja nestes intervalos de tempo que o fluxo de difusão assume valores mais elevados.

O facto da chuva incidente, para além de influenciar o fluxo capilar, também influenciar o fluxo de difusão, é algo que inicialmente não seria previsível (vd. Subcapítulo 4.2.3.5). No entanto, esta situação ocorre uma vez que a humidade na fase líquida que atravessa o elemento construtivo e atinge a superfície

<sup>80</sup> No primeiro caso de estudo o equilíbrio dinâmico é atingido no segundo ano do período de cálculo.

desse mesmo elemento é transferida para o meio ambiente sob a forma de vapor de água. Daí que a ausência da chuva incidente também influencie o fluxo de difusão.

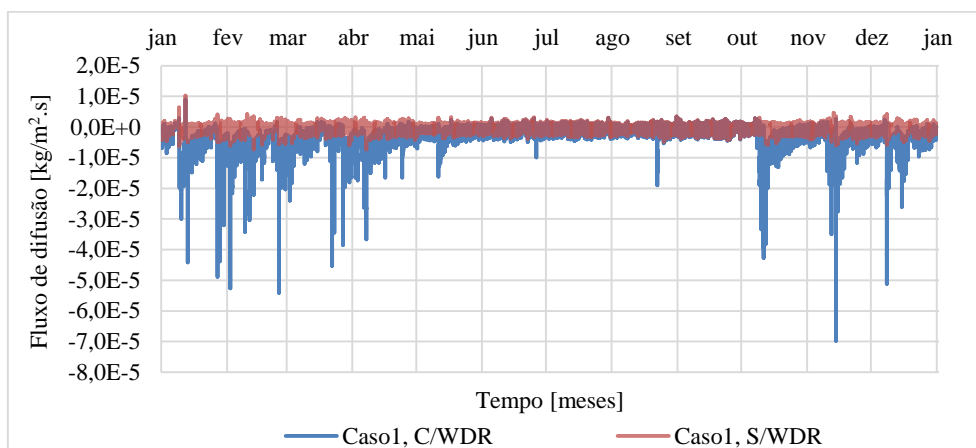


Figura 6.13 – Variação do fluxo de difusão entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

O facto da chuva incidente, para além de influenciar o fluxo capilar, também influenciar o fluxo de difusão, é algo que inicialmente não seria previsível (vd. Subcapítulo 4.2.3.5). No entanto, esta situação ocorre uma vez que a humidade na fase líquida que atravessa o elemento construtivo e atinge a superfície desse mesmo elemento é transferida para o meio ambiente sob a forma de vapor de água. Daí que a ausência da chuva incidente também influencie o fluxo de difusão.

A diferença entre os resultados das simulações com e sem chuva incidente não é idêntica ao longo do período de cálculo, uma vez que a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo nem sempre é a mesma. Esta variação deve-se às condições dos climas fronteira. Verifica-se que entre os meses de Maio e Setembro a diferença é menos significativa, uma vez que é neste intervalo de tempo que existe a menor quantidade de humidade no interior do elemento construtivo (vd. Figura 6.2).

A Figura 6.14 apresenta a variação do fluxo capilar ao longo do quarto ano do período de cálculo para as simulações com e sem chuva incidente. O fluxo capilar coincide com os intervalos de tempo em que a água incide no paramento exterior (vd. Fig. E.1, no Anexo E.1). Constata-se também que o fluxo capilar apenas ocorre no sentido do elemento construtivo pois só existem valores positivos. Esta situação deve-se ao facto de a única fonte de humidade na fase líquida exterior ao elemento construtivo considerada ser a chuva incidente. O facto do fluxo capilar ser apenas positivo corrobora a afirmação que o fluxo de humidade proveniente do elemento construtivo só ocorre sob a forma de vapor de água.

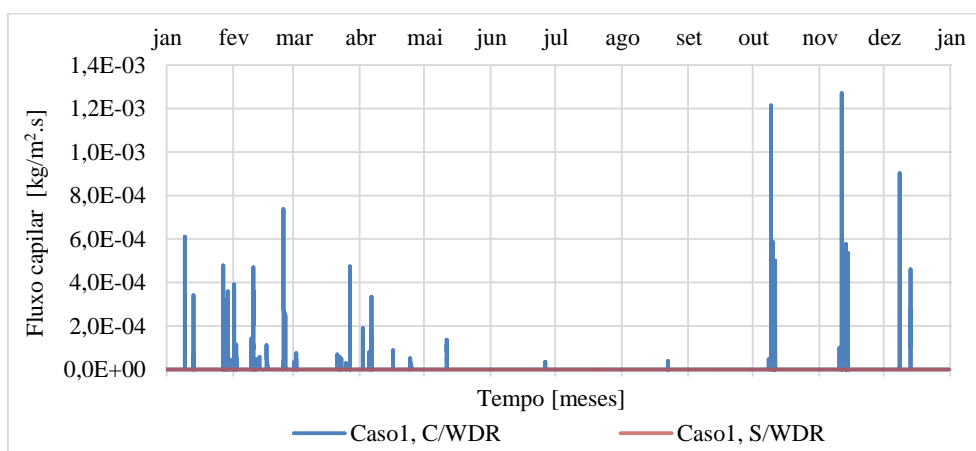


Figura 6.14 – Variação do fluxo capilar entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

Ao comparar a variação dos dois tipos de fluxo para a simulação com chuva incidente constata-se que a sua influência no fluxo de humidade é diferente, sendo a do fluxo de difusão (varia entre  $-6,97 \cdot 10^{-5}$  e  $9,03 \cdot 10^{-6}$ ) bastante inferior à do fluxo capilar (varia entre zero e  $1,27 \cdot 10^{-3}$ ). A superioridade do fluxo capilar deve-se à chuva incidente.

A Figura 6.15 apresenta a variação do fluxo de humidade referente ao clima interior para as simulações com e sem chuva incidente. Ao contrário do clima exterior as trocas de humidade referentes ao clima interior apenas ocorrem através de vapor de água, uma vez que por se tratar do clima interior não existem fontes de humidade na fase líquida exteriores ao elemento construtivo, logo, o fluxo de humidade é igual ao fluxo de difusão.

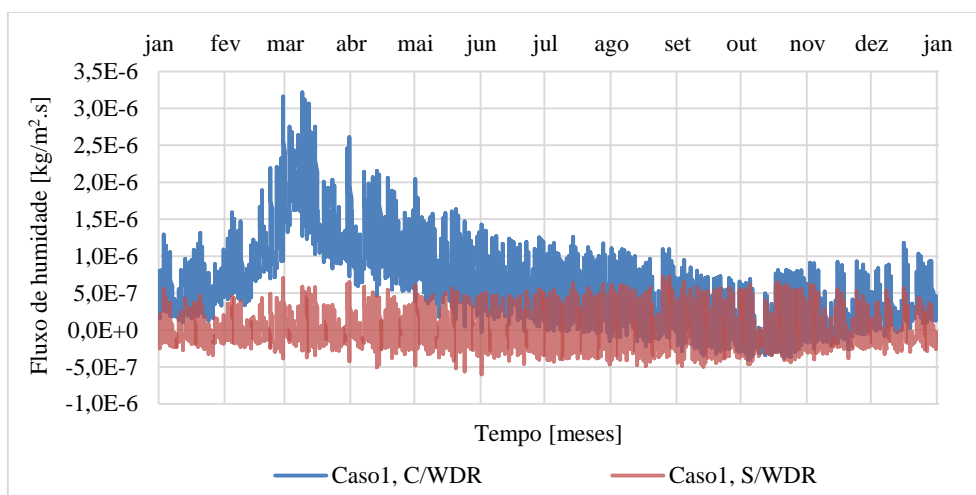


Figura 6.15 – Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo para as simulações com e sem chuva incidente do primeiro caso de estudo. Tons de vermelho forte são indicativos de sobreposição

O procedimento efectuado para o clima exterior foi efectuado para o clima interior e verificou-se que para as simulações com chuva incidente após ter sido atingido o equilíbrio dinâmico o valor de fluxo de humidade anual aumenta em relação ao ano anterior (vd. Quadro E.1, no Anexo E.1). Nas simulações sem chuva incidente após ser atingido o equilíbrio dinâmico o valor de fluxo de humidade anual diminui e o seu sentido inverte-se em relação ao sentido das simulações com chuva incidente, logo, passa a ocorrer no sentido do meio ambiente (vd. Quadro E.2, no Anexo E.1).

A diferença do fluxo de humidade entre as duas simulações para o quarto ano do período de cálculo é aproximadamente  $17,82 \text{ kg/m}^2$  (uma diferença na ordem dos 97%). Este valor elevado demonstra a importância da chuva incidente nas trocas de humidade entre o meio ambiente interior e o respectivo paramento do elemento construtivo.

### 6.1.3.2. Estudo comparativo entre os três casos de estudo

A Figura 6.16 apresenta o fluxo de difusão referente ao clima exterior para os três casos de estudo. A partir desta figura verifica-se que a variação do fluxo de difusão é mais pronunciada entre os meses de Janeiro e Abril e os meses de Outubro e Dezembro, e que nestes períodos o fluxo de difusão aumenta com o aumento da espessura. Verifica-se ainda que a variação é menor entre os meses de Maio e de Setembro, quase não havendo distinção entre os três casos de estudo.

O aumento da espessura implica valores mais elevados de pressão parcial durante a fase de humedecimento (vd. Fig. E.2, no Anexo E.1), logo, a distância em relação à pressão parcial do meio ambiente exterior é maior, o que implica um maior fluxo de difusão.

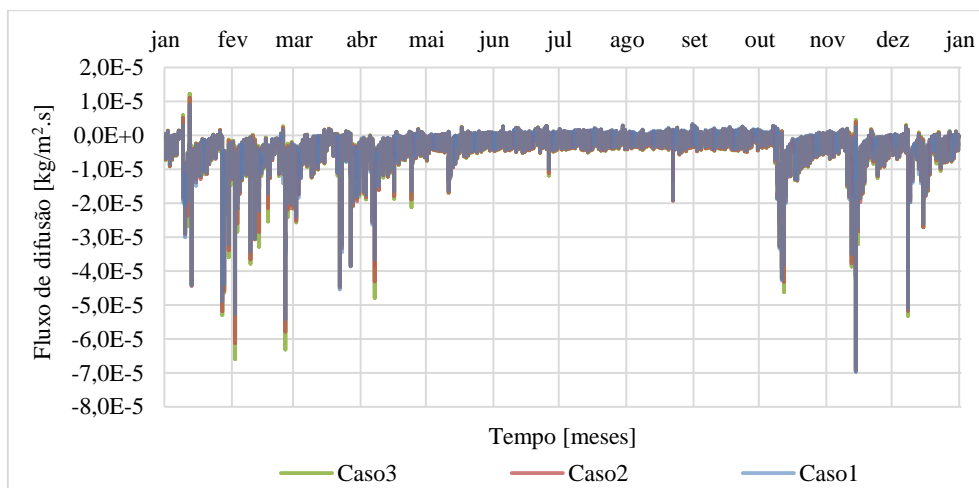


Figura 6.16 – Variação do fluxo de difusão entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou azul forte são indicativos de sobreposição

Em relação ao período entre o mês de Maio e Setembro a reduzida distinção entre os três casos de estudo corresponde ao intervalo de tempo em que a variação do fluxo de difusão é menos pronunciada. Tal deve-se ao facto da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo neste intervalo ser menor devido às condições dos climas fronteira (vd. Figura 6.4). A redução da quantidade de humidade em fase gasosa no interior do elemento construtivo implica um menor valor de pressão parcial. Este fenómeno ocorre ao longo do elemento construtivo, inclusive no paramento exterior (vd. Fig. E.2, no Anexo E.1), o que causa uma diminuição da distância em relação à pressão parcial do meio ambiente exterior, e por conseguinte, a diminuição do fluxo de difusão exterior.

Conforme foi enunciado anteriormente a única alteração efectuada foi o aumento da espessura da camada de tijolo maciço, não se tendo alterado nem o tipo de material, nem as características da precipitação ou da fachada. Uma vez que a chuva incidente é a única fonte de humidade na fase líquida exterior ao elemento construtivo, em princípio não deveria de existir variação do fluxo com o aumento da espessura. Contudo, em certas ocasiões é possível verificar uma ligeira distinção entre os valores do fluxo capilar de cada caso de estudo, e verifica-se que o fluxo capilar diminui com o aumento da espessura nessas ocasiões (vd. Figura 6.17). Esta situação deve-se à diminuição da capacidade de absorção de água proveniente do clima exterior quando o *teor de água de saturação* da camada em contacto com o clima exterior é atingido no paramento exterior.

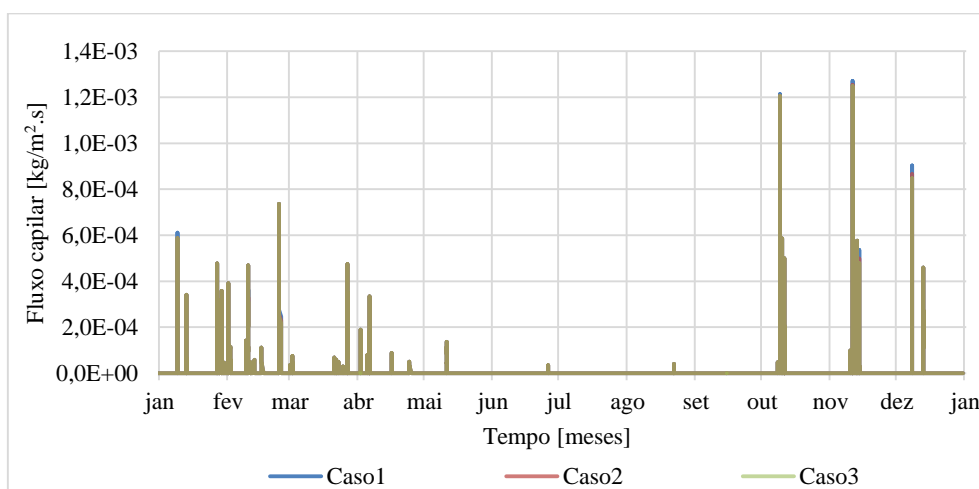


Figura 6.17 – Variação do fluxo capilar entre o meio ambiente exterior e o paramento exterior do elemento construtivo dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

A capacidade de absorção de água proveniente do exterior é condicionada pela quantidade de humidade no interior do elemento construtivo. Contudo, esta situação apenas implica diferenças no fluxo capilar quando no paramento exterior é atingido o *teor de água de saturação* da camada em contacto com clima exterior, uma vez que sob condições normais o material já não consegue absorver mais humidade.

O Quadro 6.4 apresenta os resultados do fluxo capilar para os três casos de estudo entre as quatro e as oito horas da manhã do dia 11 de Novembro de 2018. A partir deste quadro verifica-se que no intervalo de tempo seleccionado existem três horas em que o fluxo capilar é diferente de zero, e que apenas às seis da manhã o fluxo capilar é distinto entre os três casos de estudo.

A diferença às seis da manhã ocorre porque foi atingido o *teor de água de saturação* do tijolo maciço<sup>81</sup> no paramento exterior (vd. Figura 6.18), enquanto às cinco e às sete o valor de teor de água no paramento é inferior ao *teor de água de saturação* (vd. Fig. E.4 e Fig. E.5, no Anexo E.1). Quer isto dizer que às seis da manhã a quantidade de humidade que o paramento exterior consegue absorver é condicionada pelo transporte de humidade no interior do elemento construtivo.

Quadro 6.4 – Fluxo capilar para os três casos de estudo entre as quatro e as oito da manhã do dia 11 de Novembro de 2018

Caso de estudo	Fluxo capilar [kg/m <sup>2</sup> .s]				
	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
1	0,00E+00	3,447E-04	1,271E-03	4,077E-04	0,00E+00
2	0,00E+00	3,447E-04	1,255E-03	4,077E-04	0,00E+00
3	0,00E+00	3,447E-04	1,248E-03	4,077E-04	0,00E+00

A partir da Figura 6.18 é visível que quanto menor for a espessura, menor é o teor de água associado, sendo este facto mais evidente a partir dos cinco centímetros de espessura<sup>82</sup>. Esta situação ocorre já que quanto menor for a espessura, menor é a resistência à difusão de vapor de água (vd. Quadro 6.1) e porque o efeito do clima interior é exercido a partir de uma posição mais inicial. Quanto maior for o gradiente de teor de água, maior será a quantidade de humidade transportada no interior do elemento construtivo, logo, maior é a quantidade de água absorvida no paramento exterior. Daí que ao primeiro caso esteja associado a um maior fluxo capilar, já que apresenta o maior gradiente de teor de água.

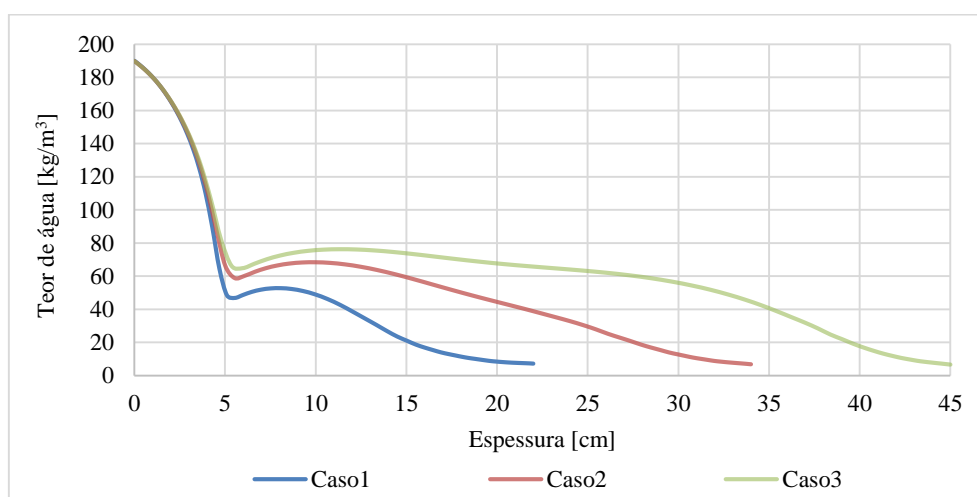


Figura 6.18 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às seis da manhã. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

A variação do fluxo de humidade referente ao clima interior é menos pronunciada com o aumento da espessura (vd. Figura 6.19). Esta situação ocorre, já que o aumento da espessura implica uma menor

<sup>81</sup> O teor de água de saturação para o tijolo maciço é 190 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>82</sup> Considerando o paramento exterior como ponto inicial.



diferença de pressão parcial entre o meio ambiente e o paramento. Esta diminuição da diferença deve-se à aproximação da pressão parcial do paramento em relação à do meio ambiente (vd. Fig. E.3, no Anexo E.1), diminuindo o potencial de transporte, e consequentemente, o fluxo de vapor de água. Deste modo é possível concluir que com o aumento da espessura diminui o fluxo de humidade entre o meio ambiente interior e o respectivo paramento do elemento construtivo.

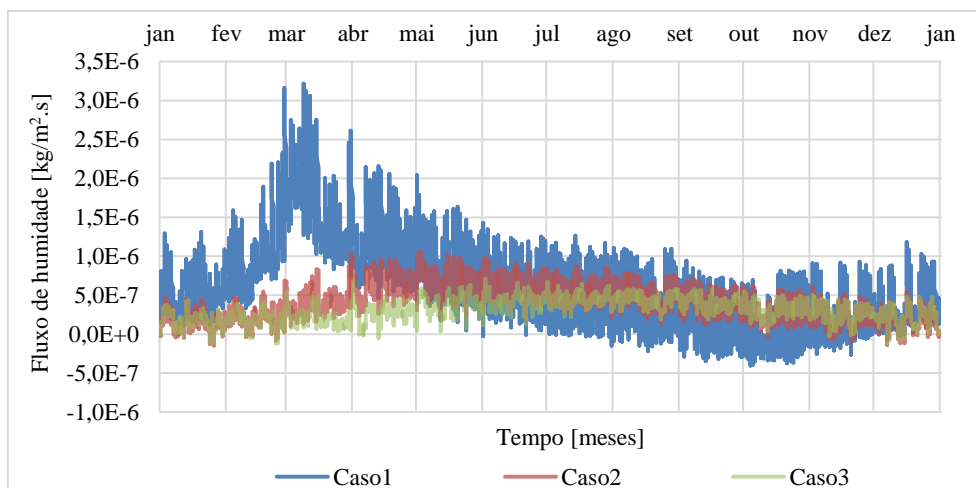


Figura 6.19 - Variação do fluxo de humidade entre o meio ambiente interior e o paramento interior do elemento construtivo dos três casos de estudo. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

O Quadro 6.5 apresenta o fluxo de humidade para o quarto ano do período de cálculo entre o meio ambiente e o paramento interior do elemento construtivo, em função do clima, do caso de estudo e da simulação (i.e. com ou sem chuva incidente), e a importância da chuva incidente nas trocas de humidade.

Quadro 6.5 – Fluxo de humidade para os três casos de estudo, e a diferença do fluxo de humidade entre as simulações com e sem chuva incidente em relação ao quarto ano do período de cálculo

Caso de estudo	Fluxo de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]					
	Clima exterior			Clima interior		
	C/WDR	S/WDR	Diferença	C/WDR	S/WDR	Diferença
1	18,41	-0,58	96,8%	18,40	-0,58	96,8%
2	12,43	-0,38	97,0%	12,42	-0,38	97,0%
3	9,68	-0,28	97,1%	9,47	-0,28	97,0%

Verifica-se uma diminuição bastante significativa do fluxo de humidade referente ao clima exterior para a simulação com chuva incidente com o aumento da espessura. A diferença de fluxo entre o primeiro e o terceiro caso é aproximadamente 8,7 kg/m<sup>2</sup>. Uma situação semelhante ocorre com o fluxo de humidade referente ao clima interior, em que a diferença de fluxo entre o primeiro e o terceiro caso é aproximadamente 8,9 kg/m<sup>2</sup>.

O Quadro 6.5 revela a influência determinante da chuva incidente nas trocas de humidade tanto no clima exterior como no clima interior, pois todos os valores das colunas das diferenças se encontram acima dos 90%. Constatou-se ainda que com o aumento da espessura ocorre um ligeiro aumento da diferença entre o fluxo de humidade das simulações com e sem chuva incidente para o clima exterior. Contudo, esta conclusão não se aplica ao clima interior, uma vez que no terceiro caso de estudo o valor da diferença é idêntico ao do segundo. Estas constatações permitem afirmar que a chuva incidente possui uma enorme influência no fluxo de humidade do clima exterior e do clima interior, e que no clima exterior as diferenças aumentam ligeiramente com o aumento da espessura da camada de tijolo maciço.

### 6.1.4. Importância dos fenómenos higrétricos ao longo da secção transversal

O presente subcapítulo elucida a influência do calor latente de fusão, do calor latente de evaporação, da condução capilar e o efeito da chuva incidente no comportamento higrétrico de um elemento construtivo vertical. Para tal, foram efectuadas duas simulações para cada fenómeno, uma em que se considera o fenómeno e é atribuída a denominação de *simulação normal*, e uma segunda simulação para o mesmo caso, mas não considerando o fenómeno em análise (e.g. calor latente de fusão).

De forma a verificar como se comportam os quatro fenómenos anteriormente mencionados foram estudadas seis datas distintas do ano 2017, e conclui-se que os fenómenos analisados têm um comportamento semelhante para todas as datas, apenas ocorrerem com amplitudes distintas devido às condições dos climas fronteira.

Uma vez que o objectivo do presente subcapítulo não é quantificar a importância destes fenómenos, mas identificar de que forma influenciam o comportamento higrétrico do elemento construtivo, são apenas comparados os resultados obtidos da variação do teor de água e da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para uma data específica, i.e. 1 de Janeiro de 2018.

#### 6.1.4.1. Calor latente de fusão

O processo de fusão de um material define-se como sendo a passagem do estado sólido para o estado líquido (e.g. degelo). Uma vez que se trata da passagem de um estado de agitação molecular inferior para um estado de agitação molecular superior é necessário fornecer energia, logo, denomina-se um processo endotérmico. Os processos endotérmicos são caracterizados por causarem a diminuição da temperatura.

No âmbito da física das construções o processo de fusão de interesse é relativo à humidade na fase sólida (i.e. gelo). A fusão ocorre aos zero graus Celsius. Contudo, em Lisboa a temperatura mínima relativa ao clima exterior é 1,2 °C (vd. Capítulo 5.1), portanto, não ocorrerá fusão, uma vez que a humidade não chega a atingir a fase sólida.

Apesar de se considerar a temperatura do clima exterior como temperatura condicionante, à noite a *temperatura superficial exterior* pode ser inferior à temperatura do clima exterior devido ao fenómeno do arrefecimento nocturno (vd. Subcapítulo 2.1.3). Contudo, devido às limitações do ficheiro climático adoptado, este fenómeno não é considerado, logo, a temperatura referente ao clima exterior é a condicionante.

De modo a validar o facto de a fusão não influenciar o comportamento higrétrico de elementos construtivos em Lisboa foi efectuada uma comparação entre a variação do teor de água e da temperatura ao longo do elemento construtivo para uma simulação com todos os processos de transporte simultâneo de calor e de humidade passíveis de serem considerados pelo programa WUFI®, e uma simulação em que a única diferença relativa à primeira simulação é não se considerar o calor latente de fusão em relação ao dia 1 de Janeiro de 2018.

Os resultados obtidos a partir das duas simulações creditam o facto do calor latente de fusão não influenciar o comportamento higrétrico dos elementos construtivos em Lisboa, uma vez que não se verificam diferenças entre os resultados obtidos do teor de água (vd. Fig. E.6, no Anexo E.1) e da temperatura (vd. Fig. E.7, no Anexo E.1) para as duas simulações.

#### 6.1.4.2. Calor latente de evaporação

A evaporação define-se como sendo o processo de passagem do estado líquido para o estado gasoso, portanto, a passagem de um estado de agitação molecular inferior para um estado de agitação molecular superior, logo, é necessário fornecer energia para que ocorra. Tal como a fusão, a evaporação também se enquadra na categoria de processos endotérmicos.

De modo a entender o efeito da evaporação no comportamento higrotérmico de elementos construtivos em Lisboa foi efectuada uma comparação entre a variação do teor de água e da temperatura ao longo do elemento construtivo para uma simulação com todos os processos de transporte simultâneo de calor e de humidade passíveis de serem considerados pelo programa WUFI®, e uma simulação em que a única diferença relativa à primeira simulação é não se considerar o calor latente de fusão em relação ao dia 1 de Janeiro de 2018.

Os resultados obtidos a partir das duas simulações esclarecem a influência do calor latente de evaporação ao longo do elemento construtivo. Em relação ao teor de água é possível afirmar que o calor latente de evaporação é responsável por uma maior quantidade de humidade no interior do elemento construtivo (vd. Fig. E.8, no Anexo E.1). Relativamente à temperatura o calor latente é responsável pela sua diminuição (vd. Fig. E.9, no Anexo E.1).

#### 6.1.4.3. Importância da condução capilar e chuva incidente

De forma a comprovar a importância da chuva incidente e o contributo da chuva incidente no transporte de humidade sob a forma líquida foram efectuadas três simulações. A primeira corresponde ao *simulação normal*, e constitui o ponto de referência; a segunda com os mesmos *inputs* que o *caso de estudo padrão* excepto não se considerar a condução capilar no controlo numérico (vd. Subcapítulo 4.3.2); e a terceira com os mesmos *inputs* que o *caso de estudo padrão* excepto considerar-se um *factor de absorção de chuva incidente* nulo (vd. Subcapítulo 4.2.3.5).

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que a condução capilar é responsável por uma elevada porção da humidade no interior do elemento construtivo, e que uma grande parcela da influência da condução capilar no estado higrotérmico do elemento construtivo deve-se à chuva incidente, já que a diferença entre a simulação sem condução capilar e a simulação com um *factor de absorção de chuva incidente* nulo é praticamente indistinguível (vd. Fig. E.10, no Anexo E.1). Contudo, existe uma diferenciação entre a segunda e a terceira simulação (vd. Fig. E.11, no Anexo E.1), portanto, a chuva incidente não é única fonte que contribui para que exista humidade num elemento construtivo.

## 6.2. Estudo sobre a influência da camada de reboco e a importância da chuva incidente

O presente subcapítulo pretende identificar a importância da camada de reboco na face exterior, interior e em ambas as faces de uma parede simples de alvenaria de tijolo maciço, e quantificar a respectiva influência da chuva incidente.

Para tal, é efectuado um estudo em que se altera a constituição do elemento construtivo de modo a averiguar quais as alterações higrotérmicas que cada camada de reboco provoca na camada de tijolo maciço. Este estudo é efectuado com argamassa de cal, de cal e cimento, e de cimento. O estudo é completado com a quantificação da influência da chuva incidente na camada de tijolo maciço ao efectuar-se duas simulações para cada caso de estudo, sendo que numa delas não se considerou a chuva incidente, e em seguida os resultados obtidos são comparados.

Em relação à constituição dos elementos construtivos analisados optou-se por uma camada de tijolo maciço de 22 centímetros de espessura, já que se trata da espessura mais influenciada pelos climas fronteira (vd. Subcapítulo 6.1). As camadas de reboco referidas no segundo, no terceiro e no quarto casos de estudo possuem uma espessura de 15 milímetros. As camadas encontram-se ordenadas do paramento exterior para o paramento interior do elemento construtivo.

O período de cálculo adoptado foi de 1 de Janeiro de 2015 a 1 de Janeiro de 2018. Contudo, existem ocasiões em que se opta por fazer referência a um intervalo de tempo específico, de 1 de Janeiro de 2017 a 1 de Janeiro de 2018, o terceiro ano do período de cálculo. Esta opção é válida, uma vez que o equilíbrio dinâmico foi atingido anteriormente a este ano.

Os *inputs* para as simulações com reboco de cal pelo exterior, pelo interior e em ambas as faces são apresentados respectivamente no Quadro D.2, no Quadro D.3 e no Quadro D.4 do Anexo D. As simulações com reboco de cal e cimento e com reboco de cimento têm os mesmo *inputs* que as simulações com reboco de cal apenas diferindo nas camadas de reboco.

Em primeiro lugar são apresentados os resultados obtidos para as simulações com o reboco de cal, e em seguida são comparados os resultados obtidos consoante a sua localização para os três tipos de reboco.

### 6.2.1. Análise ao teor de água

#### 6.2.1.1. Alteração da constituição do elemento construtivo com reboco de cal

Foram construídos quatro casos de estudo, em que a alteração implementada foi a aplicação ou não de reboco exterior e interior (vd. Quadro E.3, no Anexo E.2).

A Figura 6.20 apresenta a variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos quatro casos de estudos. A partir desta figura verificam-se os seguintes aspectos: o reboco exterior é responsável por uma variação menos pronunciada do teor de água; o reboco interior é responsável pelo aumento do teor de água, mais evidente na fase de secagem; e com o reboco em ambas as faces obtêm-se valores de teor de água mais elevados de que quando se aplica apenas reboco exterior.

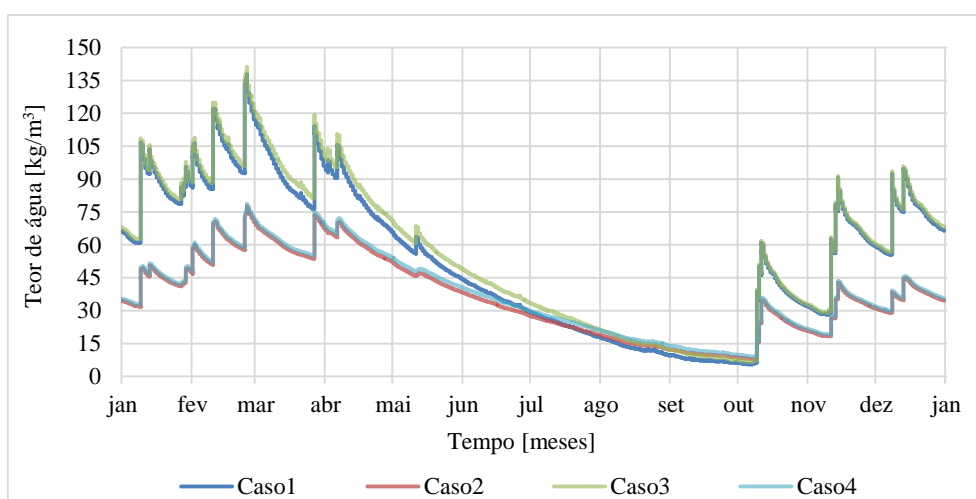


Figura 6.20 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

A aplicação de uma camada de reboco de cal pelo exterior implica uma variação menos pronunciada do teor de água, os valores de teor de água atingidos na fase de humedecimento são menores e os atingidos na fase de secagem são superiores (vd. Fig. E.12, no Anexo E.2). Esta situação deve-se ao *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima exterior que diminui cerca de 57% em relação ao *caso de estudo padrão*, diminuindo assim a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo proveniente do clima exterior, e porque a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* aumenta. Conclui-se que a aplicação de uma camada de reboco exterior é benéfica para o elemento construtivo, uma vez que a variação do teor de água da camada de tijolo maciço é menos pronunciada.

A aplicação de uma camada de reboco de cal pelo interior tem um efeito prejudicial para o elemento construtivo, já que a capacidade de evaporação da camada de tijolo maciço diminui (vd. Fig. E.13, no Anexo E.2). Ao comparar a gama de valores de teor de água atingidos no paramento interior para o *caso de estudo padrão* e na interface do terceiro caso de estudo verifica-se que a aplicação de uma camada de reboco de cal pelo interior causa um aumento dos valores atingidos (vd. Fig. E.14, no Anexo E.2).

A diminuição do fluxo de humidade nas zonas de interface pode ser causada pelas condições de continuidade que originam uma resistência hídrica, e por isso, dificultando o transporte de humidade na

fase líquida [18]. No entanto, o WUFI® considera que não existe qualquer resistência hídrica nas zonas de interface (vd. Subcapítulo 3.4), logo, as condições de continuidade na zona de interface não implicam o armazenamento de humidade que ocorre nesta zona.

Considera-se que a diminuição do fluxo de humidade nas zonas de interface seja causada pelo *coeficiente de capilaridade* da argamassa de cal, que ao ser 2,4 vezes menor que o *coeficiente de capilaridade* do tijolo maciço implica uma diminuição na velocidade de penetração da água (vd. Subcapítulo 2.2.1.2), logo, a humidade demora mais tempo a evaporar e, consequentemente, ocorre um aumento da humidade na zona de interface.

O armazenamento de humidade na interface também ocorre para a argamassa de cal e cimento e para a argamassa de cimento, sendo a magnitude do armazenamento inversamente proporcional ao *coeficiente de capilaridade* da argamassa, ou seja, quanto menor for o *coeficiente de capilaridade* da argamassa de reboco, maior será o armazenamento de humidade na zona de interface (vd. Fig. E.15, no Anexo E.2).

A aplicação de apenas reboco exterior é preferível à aplicação de reboco em ambas as faces, já que para qualquer data do período de cálculo o valor de teor de água referente ao segundo caso de estudo é inferior ao respectivo valor do quarto caso de estudo (vd. Fig. E.16, no Anexo E.2). Esta situação ocorre porque o reboco interior do quarto caso que para além de ser responsável pelo aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente*<sup>83</sup> do elemento construtivo em relação do segundo caso de estudo (vd. Quadro E.3, no Anexo E.2), também é responsável pela diminuição da capacidade de evaporação da camada de tijolo ao diminuir o *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima interior.

A Figura 6.21 apresenta a diferença do teor de água entre as simulações com e sem chuva incidente dos quatro casos analisados no presente subcapítulo. A partir desta figura constata-se que nos casos com reboco exterior a variação da importância da chuva incidente na camada de tijolo maciço é menos acentuada. Quer isto dizer que com a aplicação de um reboco exterior a chuva incidente perde importância na fase de humedecimento e ganha importância na fase de secagem do elemento construtivo. A aplicação de uma camada de reboco pelo interior aumenta ligeiramente os valores atingidos de teor de água o que implica um aumento da importância da chuva incidente na camada de tijolo, ligeiro na fase de humedecimento e mais substancial na fase de secagem do elemento construtivo.

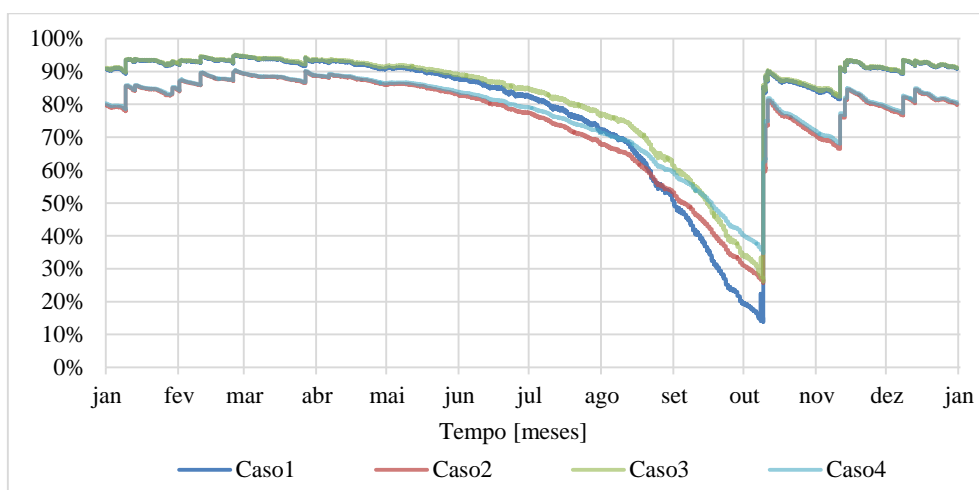


Figura 6.21 – Diferença, em percentagem, entre o teor de água das simulações com e sem chuva incidente para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

A variação do teor de água na camada de reboco exterior do segundo e do quarto casos de estudo é idêntica (vd. Fig. E.17, no Anexo E.2), logo, incluir uma camada de reboco interior não provoca alterações na quantidade de humidade da camada de reboco exterior.

<sup>83</sup> Um aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* implica uma maior dificuldade no transporte de vapor de água.

A variação do teor de água na camada de reboco interior do terceiro e do quarto casos de estudo é distinta, sendo a do terceiro caso mais pronunciada (vd. Fig. E.18, no Anexo E.2). Esta situação ocorre porque a constituição do elemento construtiva é distinta. Devido à camada de reboco exterior do quarto caso existe uma menor quantidade de humidade na camada de reboco interior, e por isso, uma variação de teor de água menos pronunciada.

### 6.2.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco

O estudo efectuado em 6.2.1.1 foi também elaborado com reboco de cal e cimento (vd. Quadro E.4, no Anexo E.2) e com reboco de cimento (vd. Quadro E.5, no Anexo E.2). Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para os três estudos consoante a localização da camada de reboco.

#### 6.2.1.2.1. Reboco aplicado pelo exterior

A Figura 6.22 apresenta a variação do teor de água da camada de tijolo maciço em função dos três tipos de reboco aplicados no paramento exterior. É ainda apresentada a variação do teor de água da camada de tijolo maciço referente ao *caso de estudo padrão*. A partir desta figura verifica-se que a aplicação de um reboco exterior diminui a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço, no entanto, a magnitude da diminuição depende do tipo de reboco.

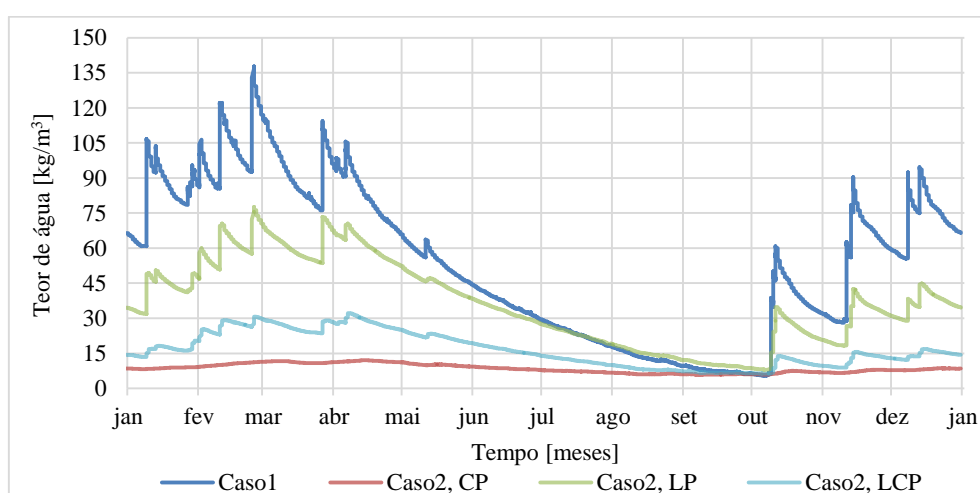


Figura 6.22 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do segundo caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento. Tom forte é indicativo de sobreposição

A aplicação de uma camada de reboco diminui a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço, pois ocorre um aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* e uma redução do *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima exterior em relação ao *caso de estudo padrão* (vd. Quadro 6.6).

Quadro 6.6 – Propriedades da camada em contacto directo com o clima exterior e com o clima interior em função dos casos de estudos analisados

Camada	$\mu$ [-]	Espessura [m]	$S_d$ [m]	Percentagem <sup>84</sup>	$A$ [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]	Percentagem
Tijolo Maciço	10,0	0,220	2,200	-	0,1100	-
Argamassa de cal	7,0	0,015	0,105	4,6%	0,0470	57,3%
Argamassa de cal e cimento	19,0		0,285	11,5%	0,0170	84,5%
Argamassa de cimento	25,0		0,375	14,6%	0,0076	93,1%

<sup>84</sup> Cálculo em relação à *espessura da camada de ar de difusão equivalente* do caso de estudo padrão.

Estas constatações permitem afirmar que a aplicação de uma camada de reboco pelo exterior é benéfica para a camada de tijolo maciço, uma vez que a variação do teor de água é menos pronunciada. Assim, quanto maior for o valor da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* e menor for o *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima exterior, menor será a quantidade de humidade no interior da camada de tijolo maciço proveniente do clima exterior. A variação menos pronunciada do teor de água é obtida para o caso com reboco de cimento.

#### 6.2.1.2.2. Reboco aplicado pelo interior

A Figura 6.23 apresenta a variação do teor de água para a camada de tijolo maciço em função dos três tipos de reboco aplicados no paramento interior e a variação do teor de água para a camada de tijolo maciço correspondente ao *caso de estudo padrão*. A partir desta figura conclui-se que o reboco interior é responsável pelo aumento da quantidade de humidade na camada de tijolo maciço, e que esse aumento depende do tipo de reboco. A capacidade de evaporação da camada de tijolo maciço é influenciada pelas características das camadas de revestimento adoptadas [20].

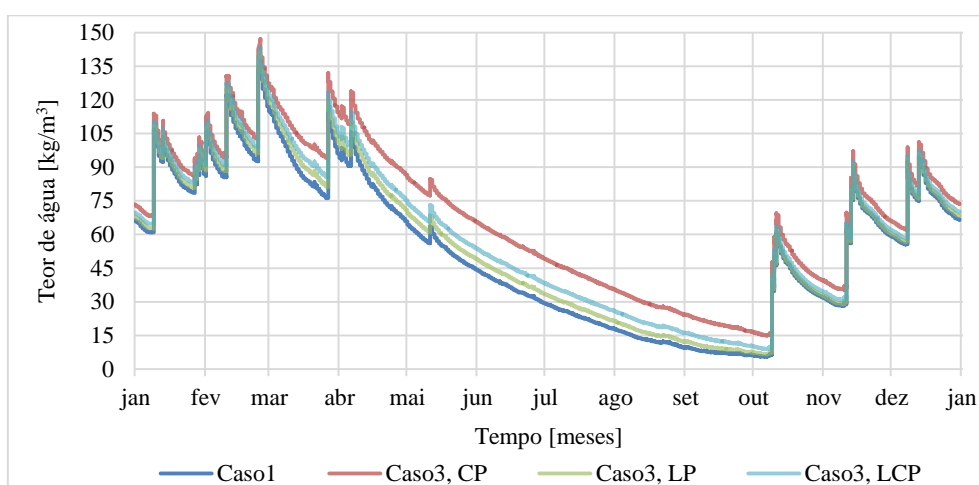


Figura 6.23 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do terceiro caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento. Tom forte é indicativo de sobreposição

Ao comparar o *caso de estudo padrão* com os restantes casos verifica-se que, para qualquer data compreendida no período de cálculo, o valor de teor de água referente ao *caso de estudo padrão* é inferior aos respectivos valores dos restantes casos, portanto, é possível afirmar que a aplicação de uma camada de reboco diminui a capacidade de evaporação da camada de tijolo maciço.

A camada de reboco pelo interior quando comparada com a camada de reboco pelo exterior apresenta duas desvantagens: a humidade proveniente do clima exterior consegue penetrar mais facilmente no elemento construtivo; e quando a humidade atinge a camada de reboco tem maior dificuldade em alcançar o clima interior, ocorrendo armazenamento de humidade nessa zona. Esta dificuldade deve-se à diminuição do *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima interior e ao aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente*, piorando à medida que o *coeficiente de capilaridade* diminui e a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* aumenta (vd. Quadro 6.6).

Estas constatações permitem afirmar que a aplicação de uma camada de reboco pelo interior é prejudicial para a camada de tijolo maciço, uma vez que ocorre um aumento da quantidade de humidade no seu interior. Assim, quanto maior for o valor da *espessura de camada de ar de difusão equivalente* do elemento construtivo e quanto menor o *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima interior, maior será a quantidade de humidade no interior da camada de tijolo maciço. A menor quantidade de humidade na camada de tijolo maciço é obtida no *caso de estudo padrão*.



#### 6.2.1.2.3. Reboco aplicado em ambas as faces

É ainda apresentada a variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com camada de reboco em ambas as faces (vd. Figura 6.24). A partir desta figura verifica-se, tal como no caso em que apenas é aplicada reboco na face exterior, que a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço diminui, e essa diminuição depende do tipo de reboco.

A diferença entre um elemento construtivo com reboco exterior e um elemento construtivo rebocado em ambas as faces em relação à quantidade de humidade na camada de tijolo maciço é mínima (vd. Subcapítulo 6.2.1.1), portanto, é possível afirmar que a responsabilidade da redução da quantidade de humidade na camada de tijolo maciço deve-se à camada de reboco exterior.

A aplicação de reboco em ambas as faces é uma situação mais vantajosa que a aplicação apenas na face interior. Uma vez que a camada de reboco exterior diminui a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço proveniente do clima exterior, logo, a resistência ao transporte de humidade causada pelo reboco interior não tem tanta importância como quando se aplica apenas reboco interior. A variação do teor de água da camada de tijolo maciço depende das propriedades da camada em contacto directo com o clima exterior (vd. Quadro 6.6).

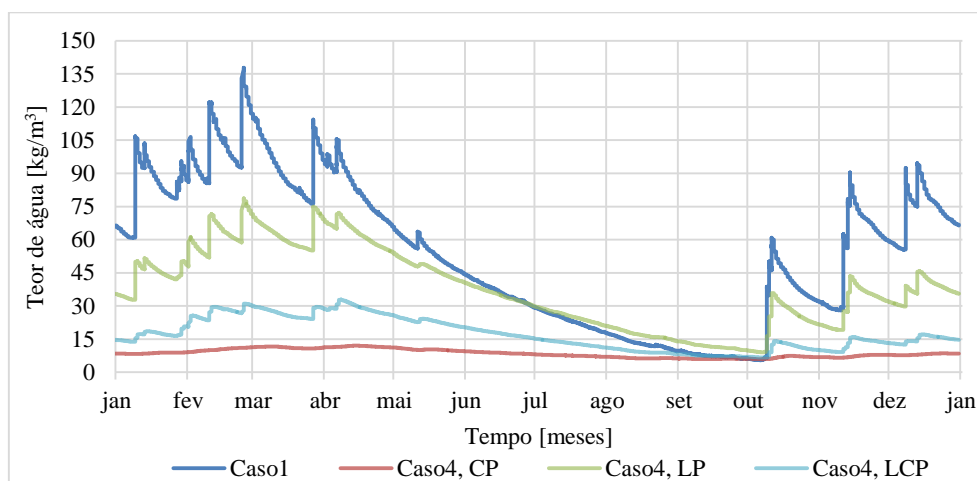


Figura 6.24 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do caso estudo padrão, e do quarto caso com reboco de cimento, de cal, e de cal e cimento. Tom forte é indicativo de sobreposição

Estas constatações permitem afirmar que a aplicação de reboco em ambas as faces é benéfica, uma vez que origina uma diminuição da quantidade de humidade na camada de tijolo maciço. Assim, quanto maior for o valor da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* do elemento construtivo e quanto menor o *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima exterior, menor será a quantidade de humidade no elemento construtivo e menos pronunciada a sua variação. A variação menos pronunciada do teor de água na camada de tijolo maciço é obtida com reboco de cimento.

Conclui-se que a aplicação de reboco apenas na face exterior ou em ambas as faces da camada de suporte é preferível à aplicação de reboco apenas na face interior.

#### 6.2.1.2.4. Importância da chuva incidente, e o teor de água na camada de reboco exterior e interior

Em relação à importância da chuva incidente para os casos com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.21, no Anexo E.2) e com reboco de cimento (vd. Fig. E.24, no Anexo E.2) verificam-se as mesmas constatações que nos casos com reboco de cal, ou seja, que quando se aplica reboco exterior existe uma variação menos pronunciada do teor de água e que quando se aplica reboco interior verificam-se valores mais elevados que os valores do *caso de estudo padrão*.

A variação do teor de água da camada de reboco interior é menos pronunciada caso se aplique um reboco exterior, já que a quantidade de humidade proveniente do clima exterior é menor. Esta situação verifica-



se tanto com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.23, no Anexo E.2) como com reboco de cimento (vd. Fig. E.26, no Anexo E.2).

Contudo, verifica-se que a magnitude destes fenómenos em relação ao *caso de estudo padrão* é tanto maior, quanto menor for o *coeficiente de capilaridade* e maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do reboco.

A variação do teor de água da camada de reboco exterior não é influenciada significativamente pela existência de reboco interior. Esta situação verifica-se tanto com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.22, no Anexo E.2) como com reboco de cimento (vd. Fig. E.25, no Anexo E.2).

## 6.2.2. Análise à temperatura

### 6.2.2.1. Alteração da constituição do elemento construtivo com reboco de cal

A Figura 6.25 apresenta a variação da temperatura no centro da camada de tijolo para os casos de estudo analisados no presente subcapítulo. A partir desta figura verifica-se: uma diferença substancial entre os casos sem reboco exterior e os casos com reboco exterior; uma diferença ligeira entre o *caso de estudo padrão* e o terceiro caso, em que este último tem temperatura superior, mais evidente na fase de humedecimento; uma diferença ligeira entre o segundo e o quarto casos de estudo, em que este último tem uma temperatura inferior, mais evidente na fase de humedecimento.

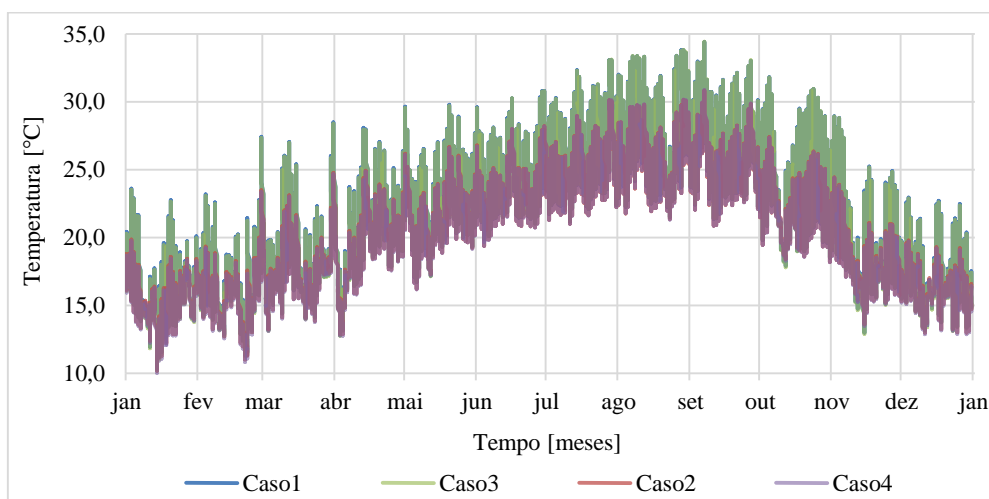


Figura 6.25 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

A diferença de temperatura entre os casos em que não se aplica e os casos em que se aplica um reboco exterior deve-se principalmente à redução do *factor de absorção de radiação por onda-curta* de 0,68 (valor característico do tijolo maciço) para 0,40 (valor característico do reboco).

É interessante verificar que ao terceiro caso de estudo está associado um *coeficiente de transmissão térmica* menor que o do *caso de estudo padrão* (vd. Fig. E.19, no Anexo E.2), apesar da quantidade de humidade na camada de tijolo maciço ser superior para o terceiro caso (vd. Figura 6.20). A mesma situação ocorre em relação ao segundo e ao quarto casos de estudo, já que ao quarto caso está associado um *coeficiente de transmissão térmica* menor que o do segundo caso (vd. Fig. E.19, no Anexo E.2).

Em relação à importância da evaporação verifica-se que não existe uma diferença significativa entre os casos de estudo com reboco exterior, e que também não existe uma diferença significativa entre os casos sem reboco exterior. No entanto, existe uma diferença substancial entre os casos com e sem reboco exterior (vd. Fig. E.20, no Anexo E.2).

Conclui-se que o aumento da quantidade de humidade no elemento construtivo não anula o acréscimo de resistência térmica associado à aplicação de uma camada de reboco (e.g. comparar o *caso de estudo padrão* e o terceiro caso de estudo), e que é possível associar um *coeficiente de transmissão térmica* menor a uma menor temperatura a meio da camada de tijolo maciço, mais evidente na fase de humedecimento. Em relação à importância da evaporação apenas existem diferenças significativas entre casos em que se aplica reboco exterior e os casos em que não se aplica reboco exterior.

#### 6.2.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco

O presente subcapítulo consiste na análise da variação da temperatura em relação ao centro da camada de tijolo maciço para os três estudos consoante a localização do reboco.

##### 6.2.2.2.1. Reboco aplicado pelo exterior

O comportamento do reboco exterior em relação ao transporte de vapor de água e de água líquida está directamente relacionado com a temperatura ao longo da camada de tijolo maciço. Quanto mais impermeável à humidade na fase gasosa e na fase líquida for o reboco maior é a temperatura na camada de tijolo maciço para a tipologia de elementos construtivos analisadas no presente subcapítulo<sup>85</sup>. Esta situação deve-se à diminuição da ocorrência de evaporação<sup>86</sup> e por implicar uma menor quantidade de humidade no interior do elemento construtivo<sup>87</sup>.

A diminuição da temperatura no interior da camada de tijolo maciço em relação ao *caso de estudo padrão* é tanto mais ampla quanto maior for o *coeficiente de capilaridade* e menor for o *factor de resistência à difusão de vapor* da camada de reboco (vd. Figura 6.26).

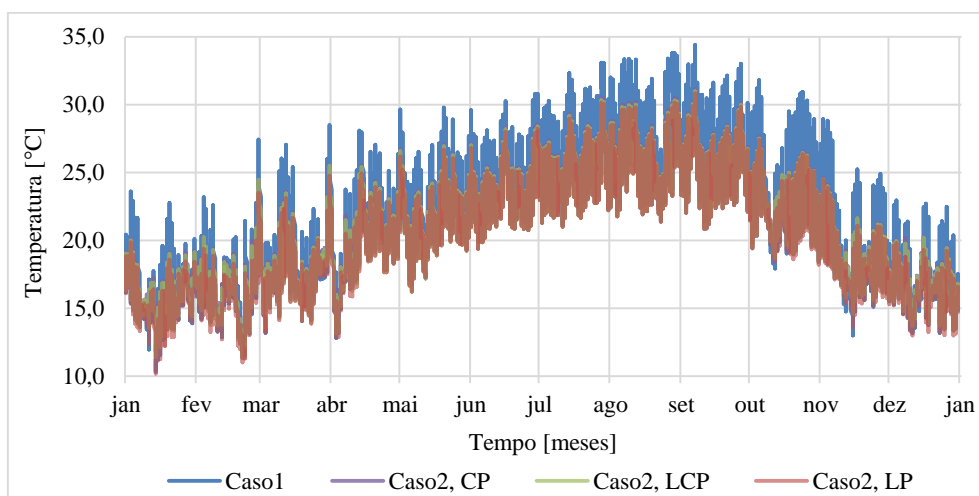


Figura 6.26 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e o segundo caso com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

A temperatura no interior do elemento construtivo depende do fluxo de calor que atravessa o elemento, dos fenómenos endotérmicos e da radiação solar. Caso algum destes contributos sofra alteração tal implicará modificação da temperatura interior do elemento construtivo.

O fluxo de calor depende do *coeficiente de transmissão térmica* e da diferença de temperatura entre o clima exterior e o clima interior. No programa de cálculo WUFI® tanto a temperatura do clima exterior como a temperatura do clima interior são independentes da constituição do elemento construtivo, logo,

<sup>85</sup> Constituídos por uma camada de reboco exterior de 1,5 centímetros e uma camada de tijolo maciço de 22,0 centímetros.

<sup>86</sup> A evaporação consome energia do sistema e consequentemente diminui a temperatura do elemento construtivo.

<sup>87</sup> Uma menor quantidade de humidade no elemento construtivo implica um menor *coeficiente de transmissão térmica*.

apenas se o *coeficiente de transmissão térmica* for alterado é que o fluxo de calor é alterado. O fluxo de calor que atravessa um elemento construtivo é obtido através da seguinte equação:

$$q = U \cdot (T_1 - T_2) \quad 6.1$$

Onde,

$q$  Fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  
 $U$  Coeficiente de transmissão térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ];  
 $T_1, T_2$  Temperatura [K].

O fluxo de calor é directamente proporcional ao *coeficiente de transmissão térmica*, logo, quanto maior o *coeficiente de transmissão térmica*, maior será o fluxo de calor que atravessa o elemento construtivo.

A temperatura na interface entre ambas as camadas em regime permanente é obtida recorrendo à *lei de Fourier* considerando um fluxo de calor constante e uma variação linear da temperatura ao longo da camada. Considerando que o elemento construtivo se encontra sob *condições de Inverno*<sup>88</sup> a temperatura na interface obtém-se recorrendo à seguinte equação:

$$T_1 = T_{si} - q \cdot R_{tij} \quad 6.2$$

Onde,

$T_1$  Temperatura da interface entre a camada de tijolo maciço e a camada de reboco [K];  
 $T_{si}$  Temperatura superficial interior [K];  
 $q$  Fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  
 $R_{tij}$  Resistência térmica da camada de tijolo maciço [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ].

A *temperatura superficial interior* é tanto maior quanto menor for o *coeficiente de transmissão térmica* (vd. Equação 2.11) e como o *fluxo de calor* é directamente proporcional ao *coeficiente de transmissão térmica*, então quanto menor for o *coeficiente de transmissão térmica*, maior será a temperatura na interface. Uma vez que a *temperatura superficial interior* e a temperatura na interface são superiores conclui-se que quanto menor for *coeficiente de transmissão térmica*, maior é a temperatura ao longo da camada de tijolo maciço para a tipologia de elemento construtivos analisada no presente subcapítulo.

Uma vez que ao elemento construtivo com reboco de cimento corresponde a menor variação do *coeficiente de transmissão térmica* (vd. Figura 6.27), constata-se que a este elemento corresponde a temperatura mais elevada ao longo da camada de tijolo maciço dos casos com reboco (vd. Figura 6.26).

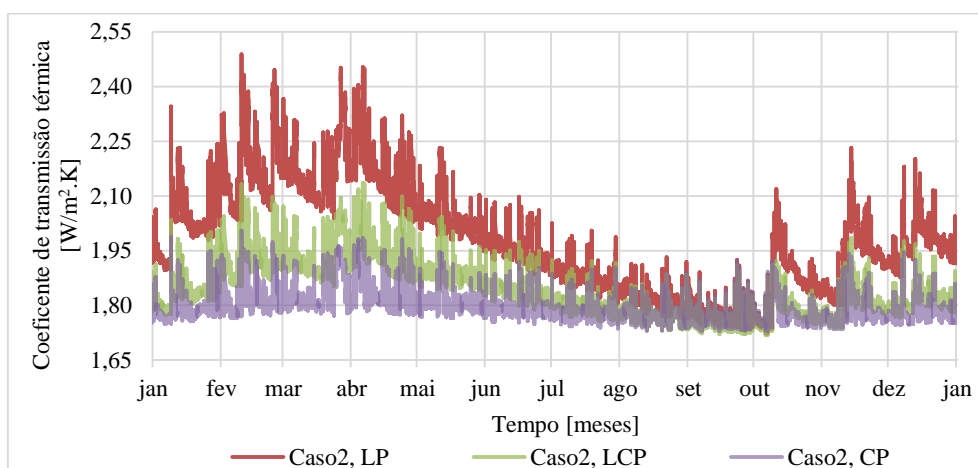


Figura 6.27 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o segundo caso de estudo de estudo com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento. Tom de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

<sup>88</sup> A temperatura do clima interior é superior à temperatura do clima exterior, logo, o fluxo de calor ocorre do interior para o exterior.

No método preconizado pelo programa WUFI® na temperatura também está contabilizado os contributos da radiação solar e dos fenómenos endotérmicos. Em relação ao contributo da radiação solar este é idêntico para os três casos, uma vez que partilham do mesmo *factor de absorção de radiação por onda-curta*. No entanto, em relação à evaporação a situação não é idêntica, já que cada caso de estudo se comporta de forma distinta em relação ao transporte de humidade.

A evaporação é um processo que tem como potencial de transporte o fluxo de vapor de água (vd. Equação 3.5), ora se o fluxo for reduzido, também o efeito da evaporação será reduzido. O fluxo de vapor de água que atravessa um elemento construtivo, em regime permanente unidireccional, é obtido recorrendo à *lei de Fick* (vd. Equação 2.20). Logo, quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* de uma camada, menor é o fluxo de vapor de água que a atravessa, quer isto dizer que o efeito da evaporação é menor, e por isso existe um menor consumo de calor e uma temperatura interior superior.

No entanto, e conforme foi demonstrado em 6.1.3.1, o fluxo de difusão também é influenciado pela quantidade de humidade na fase líquida proveniente do clima exterior. Por isso, também se deve às propriedades em relação à humidade na fase líquida dos materiais uma redução da influência da evaporação. Contudo, nas argamassas analisadas existe uma proporcionalidade inversa entre *coeficiente de capilaridade* e o *factor de resistência à difusão de vapor*, ou seja, quanto menor for o primeiro, maior é o segundo (vd. Quadro 5.2).

A partir da Figura 6.28 verifica-se a perda da importância da evaporação consoante o aumento do *factor da resistência à difusão de vapor de água* e a diminuição do *coeficiente de capilaridade* da camada de reboco (vd. Quadro 5.2), já que a diferença de temperatura entre a simulação sem e com calor latente de evaporação diminui. O caso com reboco de cimento é menos influenciado pela evaporação.

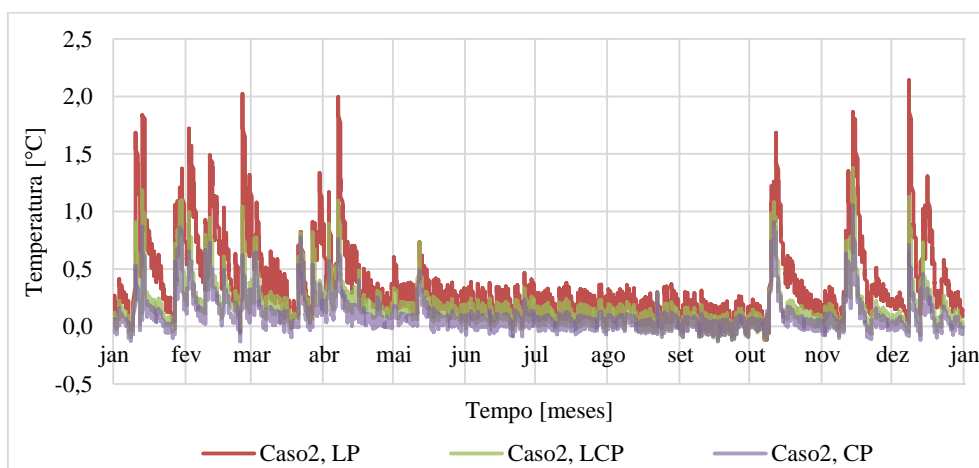


Figura 6.28 – Diferença de temperatura entre a simulação sem e com evaporação para o segundo caso de estudo com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento. Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

#### 6.2.2.2.2. Reboco aplicado pelo interior

A aplicação de uma camada de reboco pelo interior implica uma diminuição muito ligeira da temperatura no centro da camada de tijolo maciço durante a fase de secagem, e um aumento ligeiro na fase de humedecimento do elemento construtivo. Esta diminuição deve-se ao aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* e à diminuição do *coeficiente de capilaridade* da camada em contacto com o clima interior devido à aplicação de uma camada de reboco. A diminuição da temperatura é tanto maior, quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* e menor for o *coeficiente de capilaridade* do reboco (vd. Figura 6.29). Conclui-se que os casos com reboco interior têm um comportamento semelhante ao *caso de estudo padrão* em termos da temperatura da camada de tijolo.

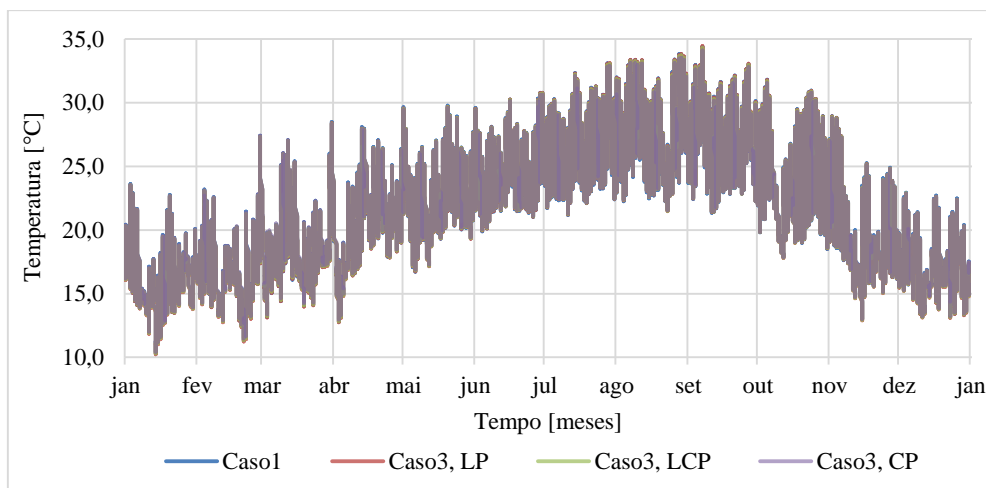


Figura 6.29 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e para o terceiro caso com rebocos de cal, de cal e cimento, e de cimento. Tom forte é indicativo de sobreposição

#### 6.2.2.2.3. Reboco aplicado em ambas as faces

Nos casos com reboco em ambas as faces não é possível afirmar que em regime permanente quanto menor o *coeficiente de transmissão térmica*, maior é a temperatura ao longo da camada de tijolo maciço, devido ao valor da temperatura nas interfaces das camadas.

Considere-se três elementos construtivos com reboco em ambas as faces sob condições de Inverno e em regime permanente. No primeiro elemento é aplicado reboco de cal, no segundo é aplicado reboco de cal e cimento, e no terceiro é aplicado reboco de cimento. O primeiro elemento tem a maior resistência térmica, já que possui a menor *condutibilidade térmica no estado seco* (vd. Quadro 5.2).

A *temperatura superficial interior* é tanto maior, quanto menor for o *coeficiente de transmissão térmica*, logo, é maior para o primeiro elemento. O fluxo de calor é tanto maior quanto maior for o *coeficiente de transmissão térmica*, logo, é maior para o terceiro elemento.

A temperatura na interface entre a camada de reboco interior e o tijolo é obtida a partir da equação 6.2 com a resistência da camada de reboco. Contudo, não é perceptível qual dos elementos possui a maior temperatura na interface devido à relação entre o fluxo de calor e a resistência da camada de reboco. Por esta razão, efectuou-se o cálculo da temperatura ao longo da secção transversal dos elementos construtivos considerados sob condições reais do meio ambiente exterior e interior (vd. Quadro 6.7). As condutibilidades térmicas consideradas são as referentes à biblioteca do WUFI® (vd. Quadro 5.2) e as resistências térmicas superficiais consideradas são as preconizadas pelo ITE 50 [38].

Quadro 6.7 – Condições do meio ambiente exterior e interior ao meio dia do dia 2 de Janeiro de 2015. Valores obtidos a partir do programa WUFI®

Meio ambiente exterior		Meio ambiente interior	
T [°C]	HR [-]	T [°C]	HR [-]
14,3	95%	21,32	53%

A partir da Figura 6.30 verifica-se que: a temperatura na interface 1 é ligeiramente maior para o elemento com menor resistência, i.e. o terceiro elemento; a temperatura na interface 2 é ligeiramente maior para o elemento com maior resistência, i.e. o primeiro elemento; e varia o elemento que tem maior temperatura ao longo da camada de tijolo maciço. Conclui-se que não é possível afirmar que quanto menor o *coeficiente de transmissão térmica*, maior é a temperatura ao longo da camada de tijolo maciço para o elemento construtivo rebocado em ambas as faces em regime permanente.

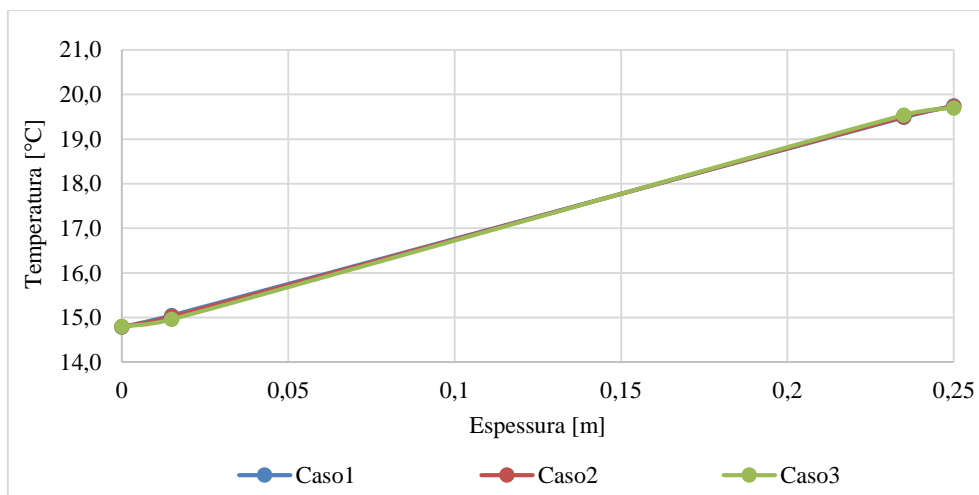


Figura 6.30 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos de estudo

No entanto, verifica-se que os resultados obtidos ao aplicar reboco em ambas as faces são semelhante aos resultados com reboco pelo exterior, portanto, existe uma diminuição da temperatura interior e a diminuição é tanto maior quanto menor for o *factor da resistência à difusão de vapor de água* e maior o *coeficiente de capilaridade* da camada de reboco (vd. Figura 6.31). Ao comparar-se os resultados do caso com reboco exterior e com reboco em ambas as faces verifica-se uma diferença ligeira, obtendo-se temperaturas superiores para o caso apenas com reboco exterior (vd. Figura 6.25).

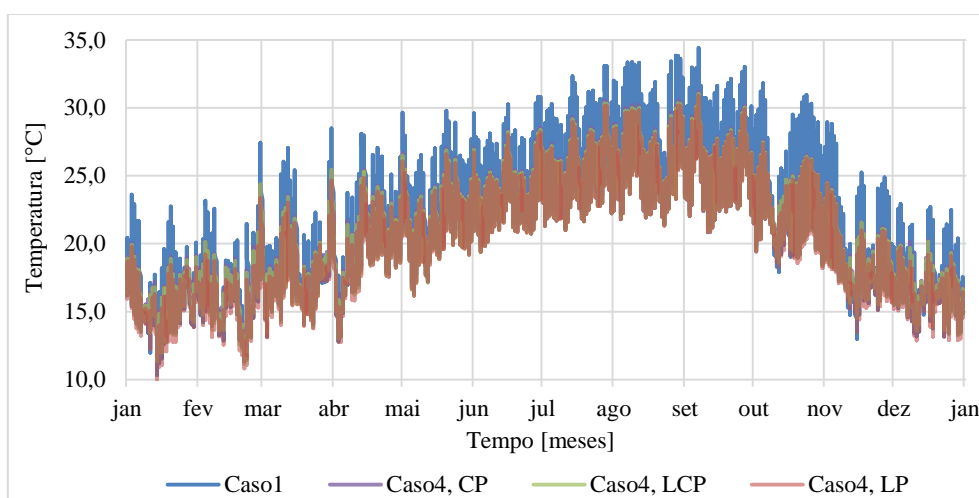


Figura 6.31 – Variação da temperatura no centro da camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão, e para o quarto caso com rebocos de cimento, de cal e cimento, e de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

### 6.3. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo interior

Nas simulações efectuadas referentes às reabilitações térmicas pelo interior assumiu-se que o elemento construtivo é rebocado em ambas as faces. Por esta razão, as simulações de reabilitação são comparadas aos respectivos casos de estudo com reboco em ambas as faces. As simulações foram efectuadas para argamassas de cal, de cal e cimento, e de cimento.

As simulações efectuadas têm os seguintes objectivos: identificar qual o comportamento higrotérmico do elemento construtivo em função do tipo de isolamento térmico e em função do tipo de reboco aplicados; e verificar quais as alterações impostas ao elemento construtivo, caso se opta por retirar a camada de reboco interior.

O Quadro 6.8 apresenta a constituição do elemento construtivo a que corresponde cada caso de estudo do presente subcapítulo. As camadas encontram-se ordenadas do paramento exterior para o interior.

Quadro 6.8 – Espessura das camadas que compõem o elemento construtivo de cada caso de estudo da reabilitação térmica pelo interior e respectiva espessura total

Camada		Caso de estudo					
		CEP	1	2	3	4	5
Reboco	Cal/cal e cimento/cimento	-	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Tijolo maciço		0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220
Reboco	Cal/cal e cimento/cimento	-	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Isolamento térmico	EPS	-	-	0,040	-	-	-
	MW	-	-	-	0,040	-	-
	ICB	-	-	-	-	0,040	-
	XPS	-	-	-	-	-	0,040
Gesso cartonado		-	-	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Espessura total [m]		0,220	0,250	0,303	0,303	0,303	0,303

Os *inputs* para as simulações com reboco de cal do presente subcapítulo são apresentados no Quadro D.5 do Anexo D. As simulações com reboco de cal e cimento e com reboco de cimento têm os mesmo *inputs* que as simulações com reboco de cal apenas diferindo nas camadas de reboco.

Em primeiro lugar são apresentados os resultados obtidos para as simulações com o reboco de cal, e em seguida são comparados os resultados obtidos consoante o tipo de isolamento térmico para os três tipos de reboco.

### 6.3.1. Análise ao teor de água

#### 6.3.1.1. Elemento construtivo com reboco de cal

O intervalo de tempo analisado foi de 1 de Janeiro de 2015 a 1 de Janeiro de 2022. As figuras apresentadas são referentes ao ano de 2021, pois todos os casos de estudo atingiram o equilíbrio dinâmico anteriormente a este ano.

A partir do Quadro 6.9 verifica-se que em todos os casos analisados a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo aumenta, o que não é benéfico para o elemento construtivo (vd. Subcapítulo 3.5). Tendo como ponto de partida o primeiro caso de estudo verificar-se que as reabilitações propostas aumentam o período de tempo necessário para atingir o equilíbrio dinâmico.

Quadro 6.9 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo, e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para o caso de estudo padrão e os cinco casos com reboco de cal

Caso de estudo	Quantidade de humidade no interior do elemento construtivo	Ano que foi atingido equilíbrio dinâmico
Caso de estudo padrão	Aumenta	2016
1	Aumenta	2016
2 - EPS	Aumenta	2021
3 - MW	Aumenta	2017
4 - ICB	Aumenta	2020
5 - XPS	Aumenta	2021



As reabilitações propostas influenciam de forma distinta os níveis de teor de água atingidos ao longo do elemento construtivo (vd. Fig. E.27, no Anexo E.3). Verifica-se que consoante o tipo de isolamento térmico os valores do teor de água da camada de tijolo maciço e de reboco interior variam significativamente. Este facto está relacionado com o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico, que conforme o seu valor pode dificultar bastante a difusão de vapor de água. Por esta razão, ocorre a acumulação da humidade na interface entre camada de reboco e de isolamento térmico, logo, existe um aumento dos níveis de teor de água ao longo do elemento construtivo.

Em relação à camada de tijolo maciço verifica-se que a aplicação de um isolamento térmico implica o aumento significativo da quantidade de humidade no seu interior (vd. Figura 6.32), tanto na fase de humedecimento, como na fase de secagem desta camada. Os valores mais elevados de teor de água correspondem ao quinto caso de estudo e os mais baixos correspondem ao terceiro caso, em relação aos casos de reabilitação. Conclui-se que a aplicação de um isolamento pelo interior causa uma diminuição da capacidade de secagem da camada de tijolo maciço e, consequentemente, um aumento da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo.

A distinção entre os níveis de teor de água atingidos para cada caso de estudo deve-se ao *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico, já que para materiais deste tipo o programa tem de adoptar a curva de armazenamento de humidade padrão. As curvas de armazenamento de humidade dos quatro tipos de isolamentos térmicos são semelhantes devido ao seu valor de porosidade<sup>89</sup> (vd. Quadro 5.1), para além de que valores de teor de água inferiores à 5% do *teor de água máximo* neste tipo de materiais são artificiais<sup>90</sup>. A partir da Fig. E.27 no Anexo E.3 verifica-se que em nenhum dos quatro casos os valores de teor de água obtidos são próximos dos limites inferiores para que se possa considerar os resultados obtidos. Por estas razões conclui-se que as diferenças obtidos em relação aos valores atingidos de teor água devem-se à capacidade de resistência à difusão de vapor do isolamento térmico, e não ao seu comportamento em relação ao atravessamento de humidade na fase líquida.

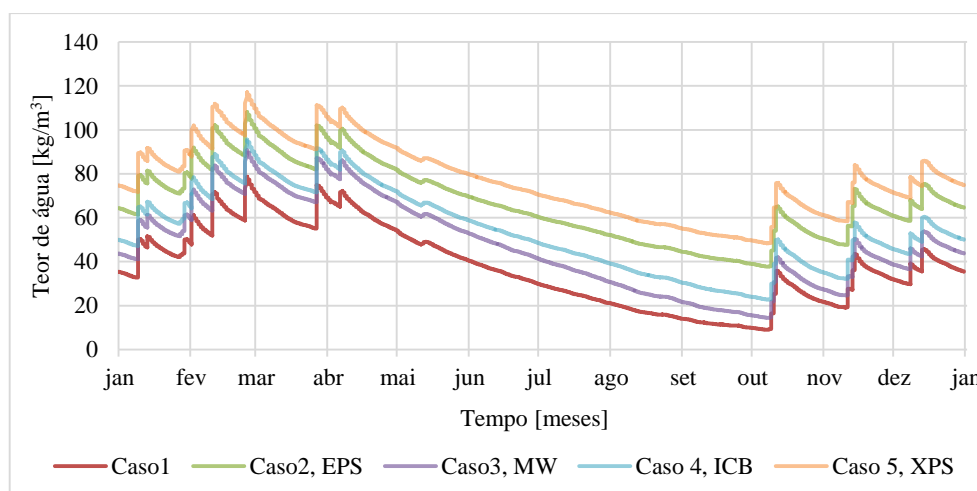


Figura 6.32 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Em alternativa ao *factor de resistência à difusão de vapor* é possível caracterizar a forma como uma camada se comporta em relação ao atravessamento de vapor de água através do conceito de *espessura da camada de ar de difusão equivalente*. Quanto maior for o seu valor, maior é a dificuldade do vapor de água em atravessar a camada. O Quadro 6.10 apresenta a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* correspondente a cada caso de estudo e o seu aumento em relação ao *caso de estudo padrão*.

<sup>89</sup> O *teor de água máximo* é obtido através do produto da porosidade pela massa volúmica da água (vd. Subcapítulo 4.1.2.1.2). Uma vez que a porosidade dos IT é semelhante, também a curva de armazenamento de humidade padrão é semelhante.

<sup>90</sup> Em relação ao isolamento térmico EPS, MW e XPS 5% de  $w_{max}$  equivale a 47,5 kg/m<sup>3</sup> e para o isolamento ICB equivale a 45 kg/m<sup>3</sup>.



Verifica-se que o maior aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* corresponde ao quinto caso de estudo e o menor aumento corresponde ao terceiro caso de estudo.

Quadro 6.10 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente e aumento em relação ao caso de estudo padrão dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces

Caso de estudo	Espessura	$S_{d,total}$	Aumento em relação ao caso de estudo padrão
	[m]	[m]	
Caso de estudo padrão	0,220	2,200	-
1	0,250	2,410	9,5%
2 - EPS	0,303	3,714	68,8%
3 - MW	0,303	2,566	16,6%
4 - ICB	0,303	2,914	32,4%
5 - XPS	0,303	6,514	196,1%

A aplicação de um isolamento térmico pelo interior causa um aumento da importância da chuva incidente, nomeadamente na época de secagem do elemento construtivo (vd. Figura 6.33). Quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico, mais a época de secagem desaparece, ou seja, tende para uma constância da importância da chuva incidente.

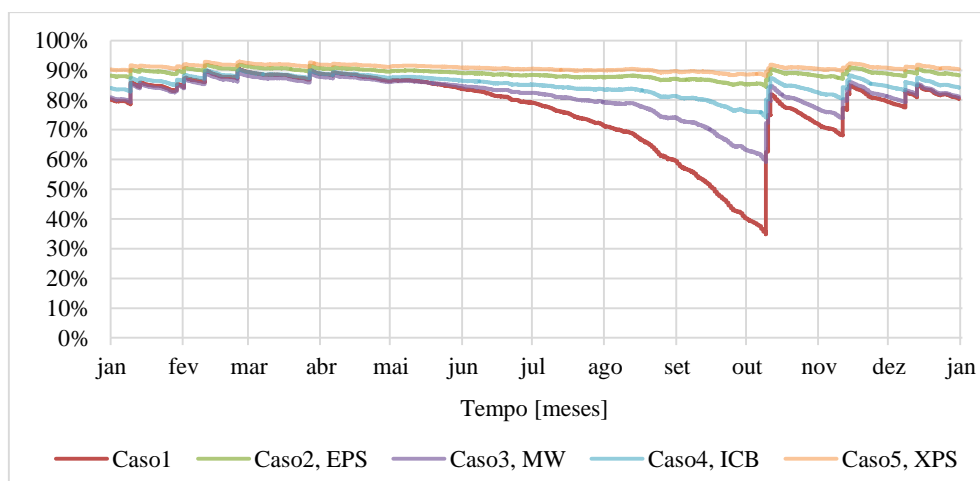


Figura 6.33 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Em relação ao facto de se retirar a camada de reboco interior aquando da aplicação do isolamento térmico os resultados obtidos são claros, as diferenças são reduzidas, sendo menores quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico (vd. Fig. E.28 a Fig. E.31, no Anexo E.3). Por esta razão considera-se que de modo a obter um melhor comportamento, em termos de quantidade de humidade no elemento construtivo, não se justifica retirar a camada de reboco interior.

### 6.3.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco

Nas simulações com reboco de cimento foi considerado o mesmo intervalo de tempo que em 6.3.1.1. No entanto, nas simulações com reboco de cal e cimento foi necessário considerar um intervalo de tempo superior devido ao quinto caso de estudo. Considerou-se de 1 de Janeiro de 2015 a 1 de Janeiro de 2024.

A partir do Quadro 6.11 verificam-se os seguintes aspectos em relação à quantidade de humidade no interior do elemento construtivo para as reabilitações propostas: com reboco de cal a humidade aumenta; com reboco de cal e cimento a aplicação de isolamento térmico causa um aumento da humidade; e com reboco de cimento a humidade diminui. Em relação ao ano em que se atinge o equilíbrio dinâmico

verifica-se que as reabilitações térmicas propostas implicam o aumento do período necessário para atingir o equilíbrio dinâmico, e que para o reboco de cal e cimento e para o reboco de cimento o ano em que é atingido o equilíbrio dinâmico é o mesmo com excepção do quinto caso de estudo.

Quadro 6.11 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para os cinco casos de estudo com reboco de cal, de cal e cimento e de cimento.

Caso de estudo	Quantidade de humidade no interior do elemento construtivo			Ano que foi atingido equilíbrio dinâmico		
	LP	LCP	CP	LP	LCP	CP
Caso de estudo padrão	Aumenta			2016		
1	Aumenta	Diminui	Diminui	2016	2016	2016
2 - EPS	Aumenta	Aumenta	Diminui	2021	2018	2018
3 - MW	Aumenta	Aumenta	Diminui	2017	2017	2017
4 - ICB	Aumenta	Aumenta	Diminui	2020	2017	2017
5 - XPS	Aumenta	Aumenta	Diminui	2021	2022	2019

As reabilitações propostas influenciam de forma distinta os níveis de teor de água atingidos ao longo do elemento construtivo para o caso com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.32, no Anexo E.3). Verifica-se que consoante o tipo de isolamento térmico, devido ao seu *factor de resistência à difusão de vapor*, os valores do teor de água da camada de tijolo maciço e da camada de reboco interior variam significativamente. A variação dos níveis de teor de água ao longo do elemento construtivo com reboco de cal e cimento é menos acentuada que com reboco de cal, enquanto com um reboco de cimento não se verifica uma variação significativa (vd. Fig. E.39, no Anexo E.3).

As reabilitações propostas com reboco de cal e cimento, tal como as reabilitações com reboco de cal, são responsáveis pelo aumento da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo em relação ao primeiro caso de estudo (vd. Fig. E.33, no Anexo E.3), sendo o aumento mais significativo consoante maior for a *espessura da camada de ar de difusão equivalente* do elemento construtivo (vd. Quadro E.6, no Anexo E.3).

Análogo ao reboco de cal, as reabilitações com reboco de cimento também são responsáveis pelo aumento da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo em relação ao primeiro caso de estudo, mais evidente na fase de humedecimento que na fase de secagem da camada de tijolo maciço. No entanto, constata-se que a variação do teor de água é bastante distinta dos casos com reboco de cal e com reboco de cal e cimento, e que os valores mais elevados do teor de água durante a fase de humedecimento são atingidos pelo terceiro caso de estudo e durante a fase de secagem são atingidos pelo quinto caso de estudo (vd. Figura 6.34).

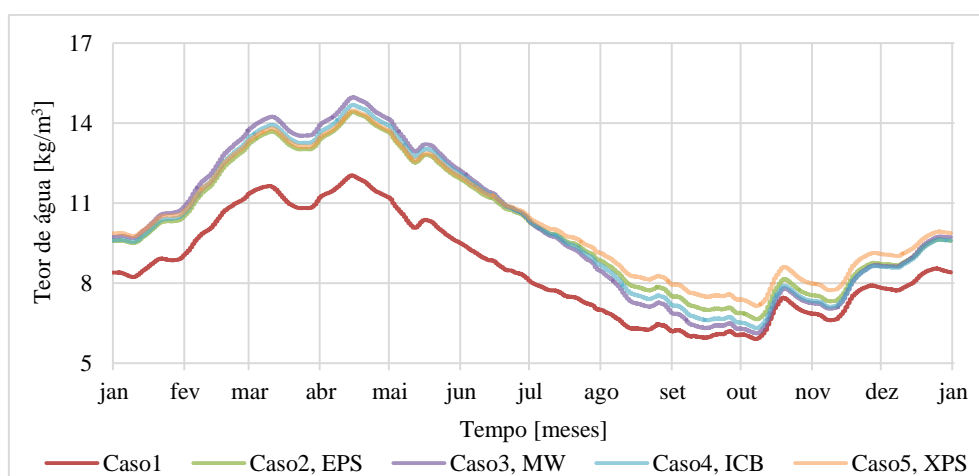


Figura 6.34 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

A alternância do caso que corresponde aos valores mais elevados de teor de água deve-se ao comportamento do isolamento térmico em relação ao transporte da humidade, já que a quantidade de humidade proveniente do clima exterior é muito menor para os casos com reboco de cimento (vd. Fig. E.40, no Anexo E.3). Durante a fase de humedecimento, quando o elemento construtivo é sujeito a uma maior quantidade de humidade, já que o valor do *factor de resistência à difusão de vapor* da lã mineral é o mais reduzido dos isolamentos analisados, existe uma maior facilidade no transporte de vapor de água, logo, maiores valores de teor de água são atingidos. Durante a fase de secagem a situação inverte-se, já que as condições dos climas fronteira promovem a saída da humidade do elemento construtivo. Este fenómeno tem maior dificuldade em ocorrer no quinto caso, já que corresponde à maior *espessura da camada de ar de difusão equivalente* dos casos de estudo devido ao *factor de resistência à difusão de vapor* do poliestireno extrudido (vd. Quadro E.6, no Anexo E.3).

A aplicação de um isolamento térmico pelo interior no caso com reboco de cal e cimento causa um aumento da importância da chuva incidente, mais evidente na época de secagem do elemento construtivo (vd. Fig. E.34, no Anexo E.3). Quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico, mais desaparece a época de secagem do elemento construtivo. A mesma situação ocorre com reboco de cimento (vd. Fig. E.40, no Anexo E.3). Ao comparar a importância da chuva incidente para os três rebocos verifica-se que esta diminui consoante o reboco exterior é mais impermeável ao vapor de água e à água líquida (vd. Figura 6.33, Fig. E.34 e Fig. E.40 no Anexo E.3).

A Figura 6.35 apresenta a variação do teor de água para o segundo caso de estudo com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces. A partir desta figura é visível a enorme importância do reboco exterior (vd. Subcapítulo 6.2.1.1). A diferenciação entre os três casos deve-se em parte às propriedades da camada de reboco, nomeadamente o *coeficiente de capilaridade* e o *factor de resistência à difusão de vapor*, que diminuem significativamente a quantidade de humidade proveniente do clima exterior e, consequentemente, a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo.

A variação menos pronunciada e em que os valores de teor de água atingidos são os mais baixos corresponde ao caso de estudo em que se aplica o reboco de cimento. Esta ocorrência deve-se ao facto de que das três argamassas de reboco analisadas a de cimento corresponde ao maior *factor de resistência à difusão de vapor*, dificultando o transporte de humidade na fase gasosa, e ao menor *coeficiente de capilaridade*, dificultando o transporte de humidade na fase líquida (vd. Quadro 5.2).

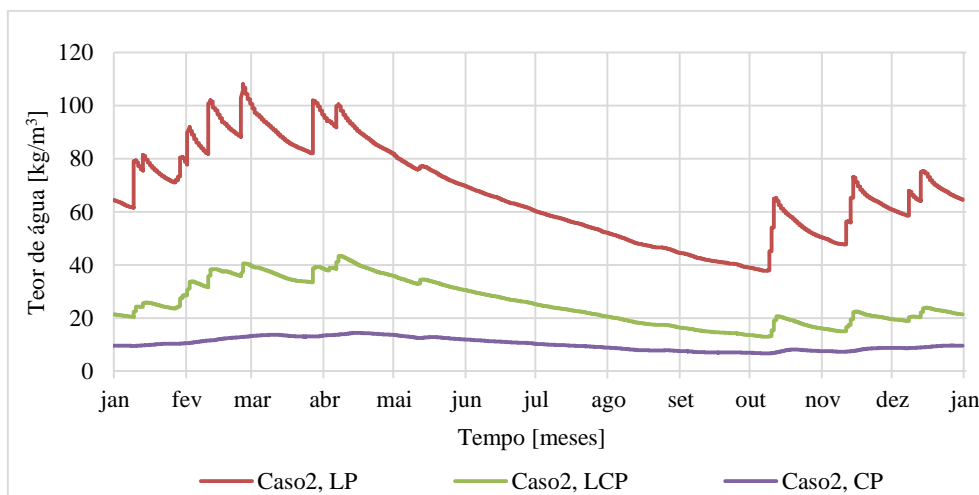


Figura 6.35 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de poliestireno moldado em função do tipo de reboco

Uma situação idêntica<sup>91</sup> ocorre para o terceiro (vd. Fig. E.45, no Anexo E.3), o quarto (vd. Fig. E.46, no Anexo E.3) e o quinto casos de estudo (vd. Fig. E.47, no Anexo E.3). Contudo, ao comparar as quatro figuras verifica-se que à medida que o *factor de resistência de difusão de vapor de água* do isolamento

<sup>91</sup> Quanto mais impermeável ao vapor de água e à água líquida for a camada de reboco, menos pronunciada é a variação do teor de água e menores são os valores atingidos.

aumenta, a diferenciação entre os casos de estudo com diferentes rebocos torna-se mais significativa, ocorrendo um afastamento dos casos de estudo com reboco de cal e com reboco de cal e cimento dos casos com reboco de cimento.

Em relação à opção de retirar a camada de reboco interior, aquando da aplicação do isolamento térmico, a diferença em relação ao elemento construtivo com reboco em ambas as faces é reduzida, sendo menor quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico. Este comportamento ocorre tanto com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.35 a Fig. E.38, no Anexo E.3) como com reboco de cimento (vd. Fig. E.41 a Fig. E.44, no Anexo E.3). Por estas razões considera-se que com o propósito de melhorar o comportamento do elemento construtivo em relação à quantidade de humidade no seu interior não se justifica retirar a camada de reboco interior aquando da aplicação de isolamento térmico pelo interior para os casos com reboco de cal e cimento ou para os casos com reboco de cimento.

Nos sistemas de isolamento térmico pelo interior analisados a primeira protecção contra a humidade proveniente do exterior é a camada de reboco. É por esta razão que existe uma variação tão significativa da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo proveniente do clima exterior consoante o tipo de reboco. Conclui-se que os resultados apreciáveis<sup>92</sup> com reabilitações térmicas pelo interior no clima de Lisboa apenas são atingidos para os casos em que se aplica reboco de cimento, que possui um *coeficiente de capilaridade* menor que o máximo recomendado por *Künzel* [33] (i.e.  $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  ou  $0,0083 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ ).

### 6.3.2. Análise à temperatura interior

#### 6.3.2.1. Estudo para reboco de cal

A aplicação de um isolamento pelo interior causa a diminuição da temperatura na camada de tijolo maciço na fase de humedecimento e o aumento da temperatura durante a fase de secagem do elemento construtivo em relação ao primeiro caso de estudo (vd. Figura 6.36). Em relação às quatro reabilitações propostas verifica-se uma diferença mais significativa entre o quinto e os restantes casos.

A diminuição da temperatura na camada de tijolo durante a estação de aquecimento<sup>93</sup> ocorre porque o isolamento térmico é aplicado posteriormente a esta camada<sup>94</sup>, logo, o calor transportado do clima interior para o clima exterior tem maior dificuldade em atingir a camada tijolo maciço, o que resulta numa diminuição da temperatura das camadas antecedentes ao isolamento. No entanto, durante a estação de arrefecimento<sup>95</sup> a situação inverte-se, ou seja, devido à localização do isolamento existe uma maior dificuldade em transportar o calor do clima exterior para o clima interior, logo, ocorre um aumento da temperatura da camada de tijolo maciço.

A partir da Figura 6.37 verifica-se uma diferença significativa entre o quinto e os restantes casos de reabilitação em relação ao respectivo *coeficiente de transmissão térmica*. Relativamente aos restantes casos de reabilitação o caso em que se aplica EPS possui o maior *coeficiente de transmissão térmica* e o caso em que se aplica MW possui o menor *coeficiente de transmissão térmica*.

A distinção mais acentuada entre o quinto e os restantes casos de reabilitação térmica deve-se ao valor da *condutibilidade térmica* do XPS no estado seco (vd. Quadro 5.1) e porque a quantidade de humidade no elemento construtivo não é suficiente para compensar o contributo do poliestireno extrudido na resistência térmica do elemento. É importante relembrar que o caso com poliestireno extrudido corresponde à maior quantidade de humidade (vd. Figura 6.32).

---

<sup>92</sup> Os resultados considera-se apreciáveis quando existe uma diminuição da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo.

<sup>93</sup> Enquanto a temperatura do meio ambiente interior é superior à temperatura do meio ambiente exterior, e por isso, o fluxo de calor ocorre do interior para o exterior (vd. Figura 5.5).

<sup>94</sup> Considera-se o paramento exterior do elemento construtivo como ponto inicial.

<sup>95</sup> Estação em que o calor é maioritariamente transportado do clima exterior para o interior, já que a temperatura do meio ambiente exterior é superior à temperatura do meio ambiente interior (vd. Figura 5.5).

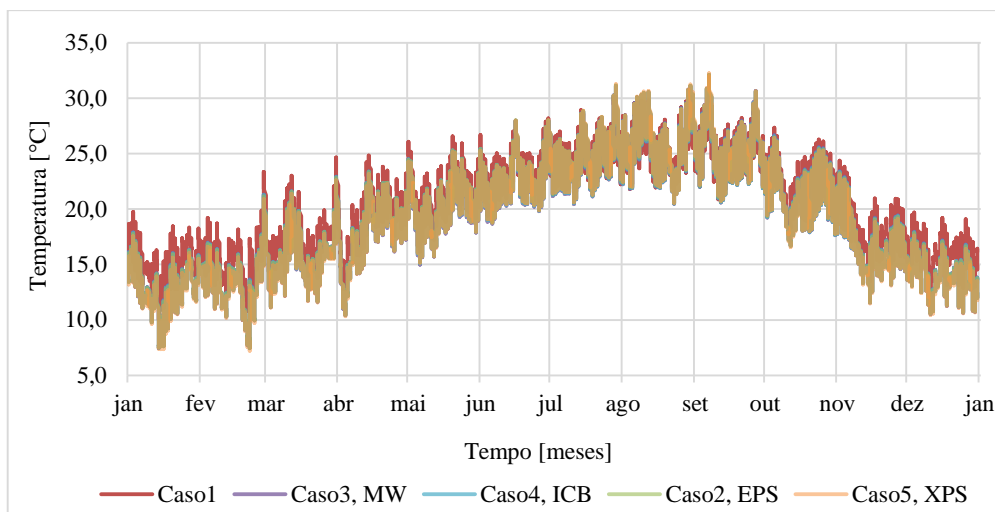


Figura 6.36 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para os cinco casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Nos elementos construtivos analisados no presente subcapítulo os principais responsáveis pela resistência térmica são: I) isolamento térmico; II) camada de tijolo maciço. Os restantes constituintes representam menos de 10% da resistência térmica do elemento construtivo (vd. Quadro E.7 e Quadro E.8, no Anexo E.3). Quer isto dizer que a camada em que existe maior interesse relativamente ao seu comportamento em função da humidade é a camada de tijolo maciço, já que a condutibilidade térmica dos isolamentos térmicos não contabilizam a humidade (vd. Quadro 5.1).

Apesar do quinto caso de estudo corresponder ao valor de *condutibilidade térmica* da camada de tijolo maciço mais elevado (vd. Fig. E.48, no Anexo E.3), e por isso, corresponde a uma menor resistência térmica, os restantes casos de estudo não conseguem ultrapassar o contributo do polistireno extrudado (vd. Fig. E.49, no Anexo E.3). Logo, o quinto caso corresponde ao menor valor de *coeficiente de transmissão térmica* dos quatro casos de reabilitação.

Em relação ao segundo, ao terceiro e ao quarto casos de estudo a distinção deve-se ao modo como o isolamento térmico se comporta em relação ao transporte de humidade na fase gasosa. Este transporte é controlado pelo *factor de resistência à difusão de vapor*. Quanto maior for este factor, mais dificuldade tem a humidade na fase gasosa em atravessar a camada, e por isso, maior será a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo (vd. Fig. E.27, no Anexo E.3), o que implica um maior *coeficiente de transmissão térmica* (vd. Subcapítulo 4.1.2.3). É por esta razão que o caso em que se aplica MW como isolamento térmico corresponde ao menor *coeficiente de transmissão térmica*.

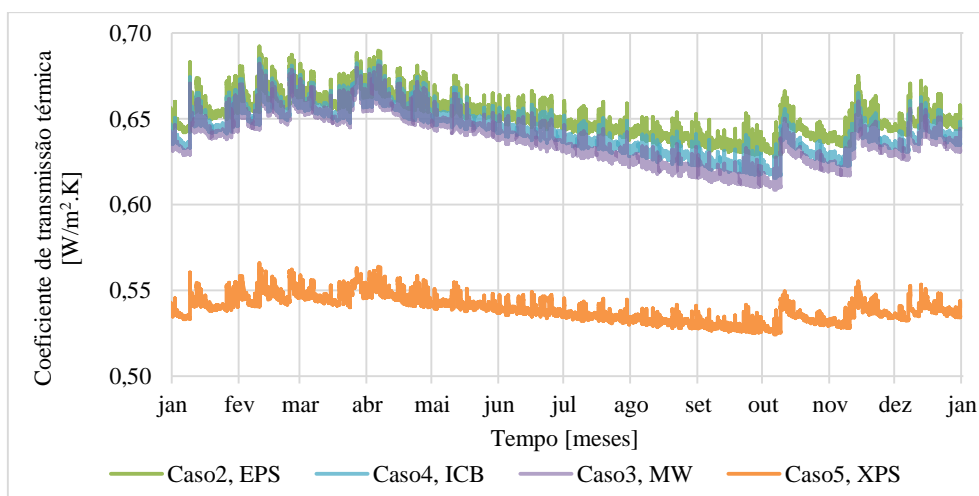


Figura 6.37 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para os casos de estudo de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Conclui-se que é possível associar um *coeficiente de transmissão térmica* mais elevado a uma temperatura mais elevada no centro da camada de tijolo maciço em reabilitações térmicas pelo interior.

### 6.3.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco

A Figura 6.38 apresenta a variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o terceiro caso de estudo com os três tipos de argamassa de reboco analisados. A partir desta figura é visível que a temperatura interior é mais elevada quanto mais impermeável ao vapor de água e à água líquida for a camada reboco. As temperaturas mais elevadas são obtidas para o caso de estudo com reboco de cimento, e as temperaturas mais reduzidas para o caso de estudo com reboco de cal.

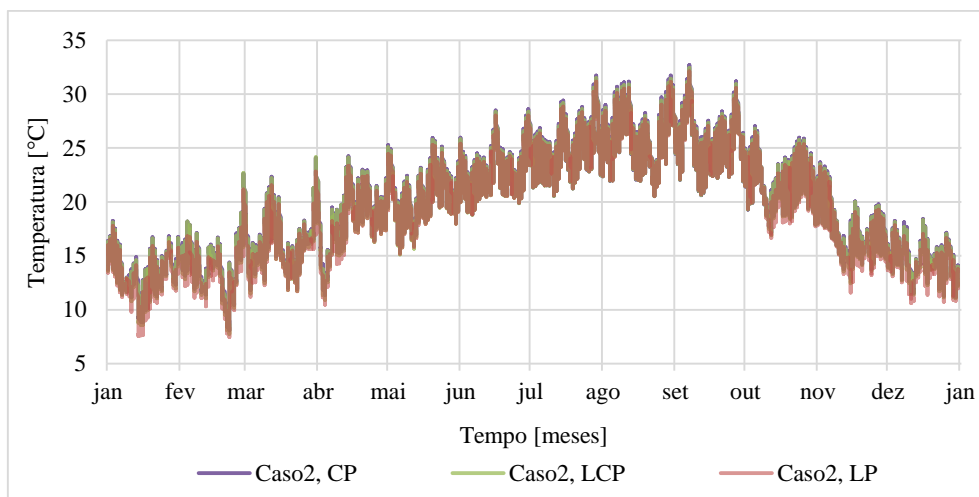


Figura 6.38 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento e de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

A partir da Figura 6.39 verifica-se que é possível associar à temperatura mais elevada a meio da camada de tijolo o caso de estudo o menor *coeficiente de transmissão térmica*, i.e. caso com reboco de cimento.

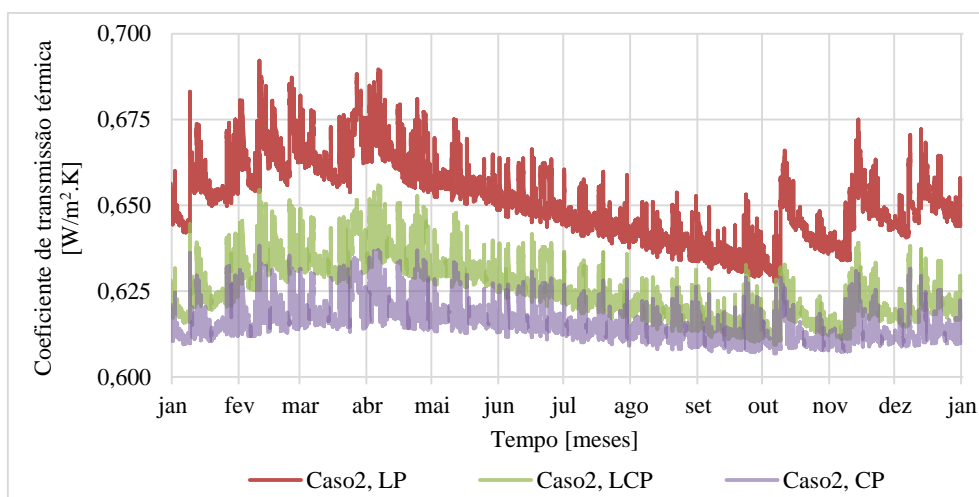


Figura 6.39 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces. Tom verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

A influência da evaporação pode ser verificada a partir da Figura 6.40 que consiste na diferença de temperatura entre as simulações em que não se considera e em que se considera o fenómeno da evaporação. É perceptível que a menor diferença corresponde ao caso com reboco de cimento, logo, é o caso em que existe menos influência da evaporação. O reboco de cimento é o reboco que corresponde

ao maior *factor de resistência à difusão de vapor* e ao menor *coeficiente de capilaridade* (vd. Quadro 5.2).

O facto de quanto mais impermeável ao vapor de água e à água líquida for a camada reboco, mais alta é a temperatura interior, é semelhante para o terceiro, o quarto e o quinto casos de estudo apenas ocorrendo a magnitudes ligeiramente diferentes (vd. Fig. E.50 a Fig. E.52, no Anexo E.3).

Conclui-se que quanto mais impermeável ao vapor de água e à água líquida for o reboco exterior, menos pronunciada é a variação do *coeficiente de transmissão térmica* e menor é a influência da evaporação, sendo assim possível associar a meio da camada de tijolo uma temperatura superior.

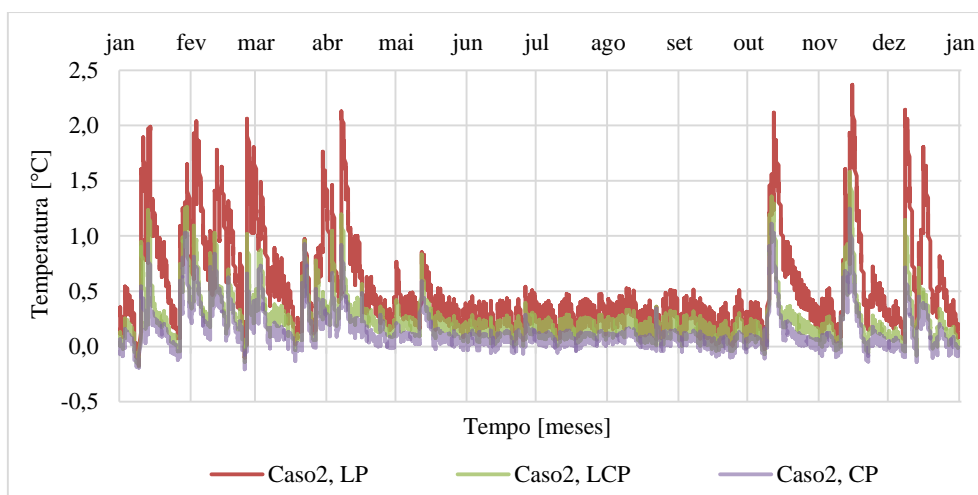


Figura 6.40 – Variação da diferença de temperatura a meio da camada de tijolo entre as simulações sem e com evaporação para o segundo caso (EPS) com reboco de cimento, de cal e cimento e de cal em ambas as faces.

Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

#### 6.4. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo exterior

Conforme foi assumido em 6.3 também se assumiu no estudo sobre reabilitação térmica pelo exterior que os elementos construtivos são rebocados em ambas as faces. Por esta razão, as simulações de reabilitação são comparadas aos respectivos casos com reboco em ambas as faces (i.e. primeiro caso de estudo). As simulações foram efectuadas para argamassa de cal, de cal e cimento, e de cimento.

As simulações efectuadas têm os seguintes objectivos: identificar qual o comportamento higrotérmico do elemento construtivo em função do tipo de isolamento térmico e em função do tipo de reboco; e verificar quais as alterações impostas ao elemento construtivo, caso se opta por retirar a camada de reboco exterior ou caso não existam camadas de reboco.

O Quadro 6.12 apresenta a constituição do elemento construtivo que corresponde a cada caso de estudo do presente subcapítulo. As camadas encontram-se ordenadas do paramento exterior para o interior.

Os *inputs* para as simulações com reboco de cal do presente subcapítulo são apresentados no Quadro D.6 do Anexo D. As simulações com reboco de cal e cimento e com reboco de cimento têm os mesmo *inputs* que as simulações com reboco de cal apenas diferindo nas camadas de reboco.

Em primeiro lugar são apresentados os resultados das simulações com o reboco de cal, e em seguida são comparados os resultados dos três tipos de reboco consoante o tipo de isolamento.

Quadro 6.12 – Espessura das camadas que compõem o elemento construtivo de cada caso de estudo da reabilitação térmica pelo exterior e a respectiva espessura total

Camada		Caso de estudo			
		CEP	1	2	3
Reboco sintético		-	-	0,002	0,002
Isolamento térmico	EPS	-	-	0,040	-
	XPS	-	-	-	0,040
Reboco	Cal/cal e cimento/cimento	-	0,015	0,015	0,015
Tijolo maciço		0,220	0,220	0,220	0,220
Reboco	Cal/cal e cimento/cimento	-	0,015	0,015	0,015
Espessura total [m]		0,220	0,250	0,292	0,292

### 6.4.1. Análise ao teor de água

#### 6.4.1.1. Elemento construtivo com reboco de cal

O intervalo de tempo analisado foi de 1 de Janeiro de 2015 a 1 de Janeiro de 2021. As figuras apresentadas no presente subcapítulo são referentes ao ano de 2020, uma vez que o equilíbrio dinâmico foi atingido anteriormente a este ano para todos os casos de estudo analisados.

As reabilitações térmicas propostas são vantajosas, uma vez que a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo diminui, no entanto, implicam um aumento do período necessário para que seja atingido o equilíbrio dinâmico (vd. Quadro 6.13).

Quadro 6.13 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico para o caso de estudo padrão e os três casos com reboco de cal em ambas as faces

Caso de estudo	Quantidade de humidade no interior do elemento construtivo	Ano que foi atingido equilíbrio dinâmico
Caso de estudo padrão	Aumenta	2016
1	Aumenta	2016
2 - EPS	Diminui	2017
3 - XPS	Diminui	2017

A quantidade de humidade no interior do elemento construtivo, mais concretamente na camada de tijolo maciço, é completamente distinta caso se aplique um isolamento térmico pelo exterior com reboco sintético (vd. Figura 6.41). Este facto deve-se ao valor do *coeficiente de capilaridade* e ao valor do *factor de resistência à difusão de vapor* da argamassa sintética (vd. Quadro 5.2) que dificultam o transporte de humidade proveniente do clima exterior, logo, ocorre uma diminuição bastante substancial da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo, e também porque a camada de isolamento térmico condiciona bastante o transporte de humidade.



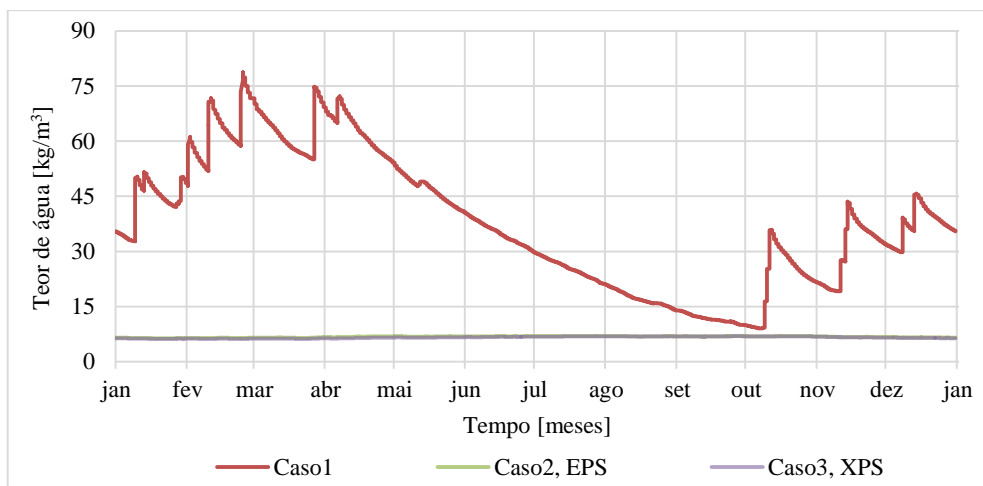


Figura 6.41 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do primeiro, segundo e terceiro casos de estudo com reboco de cal ambas as faces. Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

O tipo de isolamento aplicado numa reabilitação térmica pelo exterior tem pouca importância, já que a diferença de teor de água entre ambos os casos é ligeira, no entanto, ao caso do EPS correspondem os valores de teor de água mais elevados (vd. Fig. E.53, no Anexo E.4). Esta situação verifica-se porque o *factor de resistência à difusão de vapor* do EPS é inferior ao *factor de resistência à difusão de vapor* do XPS, logo, uma maior quantidade de humidade proveniente do clima exterior atinge a camada de tijolo maciço. Se se comparar o aumento da *espessura da camada de ar de difusão equivalente* em relação ao *caso de estudo padrão* verifica-se que o aumento mais elevado corresponde ao terceiro caso de estudo (vd. Quadro 6.14).

Quadro 6.14 – Espessura do elemento construtivo, espessura da camada de ar de difusão equivalente total e o respectivo aumento em relação ao caso de estudo padrão

Caso de estudo	Espessura	$S_{d,total}$	Aumento em relação ao <i>caso de estudo padrão</i>
	[m]	[m]	
Caso estudo padrão	0,220	2,200	-
1	0,250	2,410	9,5%
2 - EPS	0,292	5,610	155,0%
3 - XPS	0,292	8,410	282,3%

Em relação à importância da chuva incidente na camada de tijolo maciço verifica-se uma diferença bastante significativa caso se aplica um isolamento pelo exterior (vd. Figura 6.42). Enquanto a importância da chuva incidente no primeiro caso varia aproximadamente entre 35 e 90%, nos casos referentes a reabilitação varia aproximadamente entre 1 e 7% (Fig. E.54, no Anexo E.4). Conclui-se que a aplicação de um isolamento térmico pelo exterior implica que uma menor quantidade de humidade atinga a camada de tijolo maciço, causando uma redução substancial da importância da chuva incidente. Esta redução é tanto maior quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento térmico. Nas simulações efectuadas tal corresponde ao caso com poliestireno extrudido.

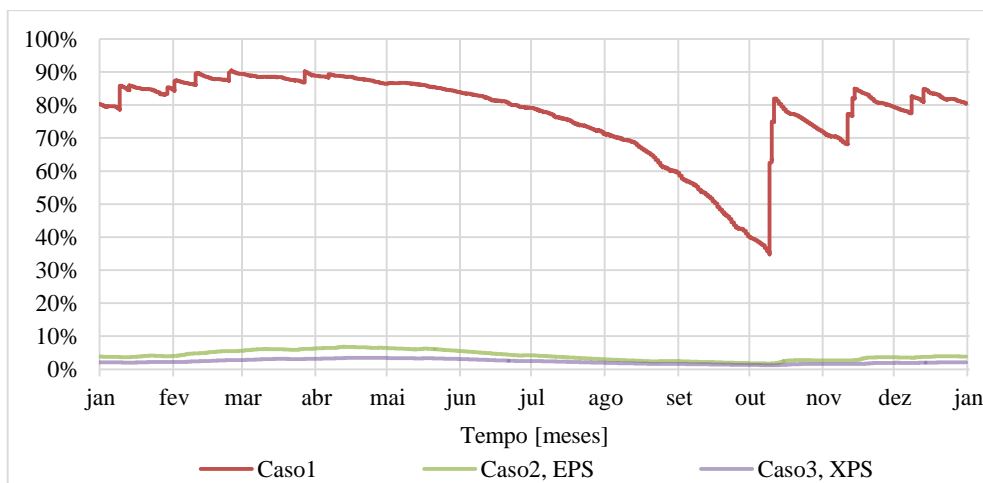


Figura 6.42 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do primeiro, segundo e terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tons verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

Em relação as alterações impostas ao elemento construtivo, caso se opte por retirar a camada de reboco exterior ou caso não existe nenhuma camada, verificou-se que as diferenças são mínimas, tanto para o caso com isolamento de poliestireno extrudido como para o caso com poliestireno moldado (vd. Fig. E.55 e Fig. E.56, no Anexo E.4). Por esta razão, conclui-se que, caso se opte por conservar ambas as camadas ou apenas a camada de reboco interior, a quantidade de humidade no elemento construtivo é semelhante ao caso em que não existem camadas de reboco, portanto, qualquer uma destas opções não é prejudicial para o elemento construtivo em termos de quantidade de humidade no seu interior.

#### 6.4.1.2. Comparação entre os três tipos de reboco

Nos casos com reboco de cal e cimento e com reboco de cimento o intervalo de tempo analisado foi o mesmo que em 6.4.1.1, sendo as figuras apresentadas referentes ao ano de 2020.

As reabilitações térmicas propostas para os três tipos de reboco são vantajosas, uma vez que a quantidade de humidade no interior do elemento construtivo diminui. No entanto, também implicam um aumento do período necessário para que seja atingido o equilíbrio dinâmico (vd. Quadro 6.15).

Quadro 6.15 – Verificação da quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e o ano em que foi atingido o equilíbrio dinâmico

Caso de estudo	Quantidade de humidade no interior do elemento construtivo			Ano que foi atingido equilíbrio dinâmico		
	LP	LCP	CP	LP	LCP	CP
Caso de estudo padrão	Aumenta			2016		
1	Aumenta	Diminui	Diminui	2016	2016	2016
2 - EPS	Diminui	Diminui	Diminui	2017	2017	2017
3 - XPS	Diminui	Diminui	Diminui	2017	2017	2017

A partir da Figura 6.43 verifica-se que os valores mais elevados de humidade no interior da camada de tijolo maciço não coincidem com a época em que ocorre precipitação, ou seja, existe uma inversão da fase de humedecimento com a fase de secagem do elemento construtivo. Verifica-se ainda que a quantidade de humidade na camada de tijolo é apenas ligeiramente influenciada pelo tipo de reboco, o que demonstra a pouca influência que estes rebocos têm em soluções construtivas com isolamento pelo

exterior. Os valores mais elevados de teor de água durante a fase de secagem<sup>96</sup> são atingidos no caso com reboco de cimento, e na fase de humedecimento são atingidos no caso com reboco de cal.

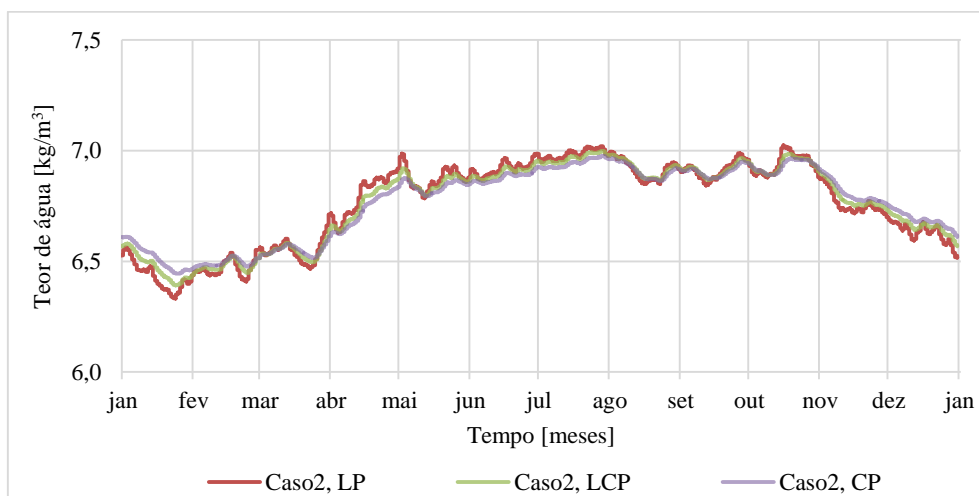


Figura 6.43 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

A inversão das fases de maior e de menor quantidade de humidade no interior do elemento construtivo em relação aos outros casos de estudo analisados na presente dissertação deve-se à reabilitação térmica pelo exterior. Devido ao diminuto *coeficiente de capilaridade* do reboco sintético (vd. Quadro 5.2) e ao comportamento dos isolamentos térmicos analisados em relação à humidade na fase líquida, o transporte de humidade na fase líquida é fortemente condicionado. Devido aos elevados valores do *factor de resistência à difusão de vapor* do reboco sintético e dos isolamentos térmicos analisados, e consequentemente os elevados valores da *espessura da camada de ar de difusão equivalente de difusão* de cada caso de estudo (vd. Quadro 6.16), implicam um reduzido transporte de humidade proveniente do clima exterior na fase gasosa. Conclui-se que a camada de reboco sintético e de isolamento térmico criam uma barreira ao transporte de humidade proveniente do exterior reduzindo significativamente a quantidade de humidade na camada de tijolo maciço. Logo, a maior parte da humidade que existe nesta camada tem origem no clima interior, sendo controlada pela humidade relativa do clima exterior (vd. Figura 5.4).

Na fase de secagem os valores mais elevados são atingidos com o reboco de cimento, porque mais dificilmente deixa a humidade sair da camada de tijolo devido ao seu *coeficiente de capilaridade* e *factor de resistência à difusão de vapor* (vd. Quadro 5.2). Na fase de humedecimento os valores mais elevados são atingidos com o reboco de cal, porque existe uma maior facilidade no transporte de humidade devido ao seu valor de *coeficiente de capilaridade* e *factor de resistência à difusão de vapor* (vd. Quadro 5.2).

Quadro 6.16 – Espessura da camada de ar de difusão equivalente do elemento construtivo, e o seu aumento em relação ao caso de estudo padrão

Caso de estudo	S <sub>d,total</sub> [m]			Aumento em relação ao <i>caso de estudo padrão</i>		
	LP	LCP	CP	LP	LCP	CP
Caso estudo padrão	2,200			-		
1	2,410	2,770	2,950	9,5%	25,9%	34,1%
2 – EPS	5,610	5,970	6,150	155,0%	171,4%	179,5%
3 – XPS	8,410	8,770	8,950	282,3%	298,6%	306,8%

<sup>96</sup> A fase de secagem do elemento construtivo corresponde à fase em que existe menor quantidade de humidade no interior do elemento construtivo e a fase de humedecimento corresponde à fase em que existe maior quantidade de humidade.

Os casos com isolamento de poliestireno extrudido têm uma situação semelhante à dos casos com poliestireno moldado, apesar dos valores atingidos serem ligeiramente inferiores devido ao *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento XPS ser superior ao *factor de resistência à difusão de vapor* do EPS. Verifica-se que os valores mais elevados de teor de água durante a fase de humedecimento são atingidos para o caso de estudo com reboco de cal, e durante a fase de secagem são atingidos para o caso com reboco de cimento (vd. Figura 6.44).

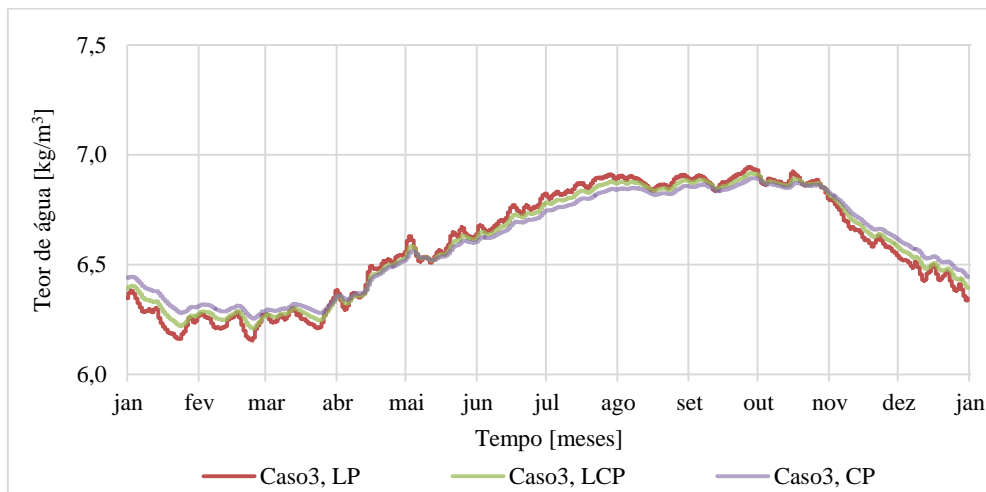


Figura 6.44 – Variação do teor de água para camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Em relação à importância da chuva incidente na camada de tijolo maciço verifica-se uma redução bastante significativa da humidade proveniente do clima exterior caso se aplique um isolamento pelo exterior. Esta redução é tanto maior quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento. Estas constatações são válidas tanto para os casos com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.57, no Anexo E.4) como para os casos com reboco de cimento (vd. Fig. E.60, no Anexo E.4).

Em relação as alterações impostas ao elemento construtivo, caso se opte por retirar a camada de reboco exterior ou caso não exista nenhuma camada de reboco, verificou-se que as diferenças são mínimas, tanto para os casos com reboco de cal e cimento (vd. Fig. E.58 e Fig. E.59, no Anexo E.4) como para os casos com reboco de cimento (vd. Fig. E.61 e Fig. E.62, no Anexo E.4). Por esta razão conclui-se, que caso se opte por conservar ambas as camadas ou apenas a camada de reboco interior, a quantidade de humidade no elemento construtivo é semelhante ao caso em que não existem camadas de reboco, portanto, qualquer uma destas opções não é prejudicial para o elemento construtivo em termos de quantidade de humidade no seu interior.

## 6.4.2. Análise à temperatura interior

### 6.4.2.1. Estudo sobre reboco de cal

A aplicação de um isolamento térmico pelo exterior origina uma variação menos pronunciada da temperatura na camada de tijolo maciço, e durante a estação de aquecimento a temperatura na camada de tijolo maciço do segundo e do terceiro casos de estudo é superior à temperatura do primeiro caso (vd. Figura 6.45). Ainda a partir desta figura verifica-se que durante a estação de aquecimento a temperatura interior do caso com XPS é superior à temperatura interior do caso com EPS.

Durante a fase de aquecimento a temperatura na camada de tijolo maciço é superior nos casos em que se aplica isolamento térmico. Devido à resistência térmica inerente a estes materiais existe uma acumulação de calor proveniente do clima interior nas camadas do elemento construtivo posteriores ao isolamento. Na Fig. E.63 do Anexo E.4 é visível que a variação da temperatura para as camadas

posteriores ao isolamento é menor quando comparada com a variação da temperatura das mesmas camadas para o primeiro caso de estudo.

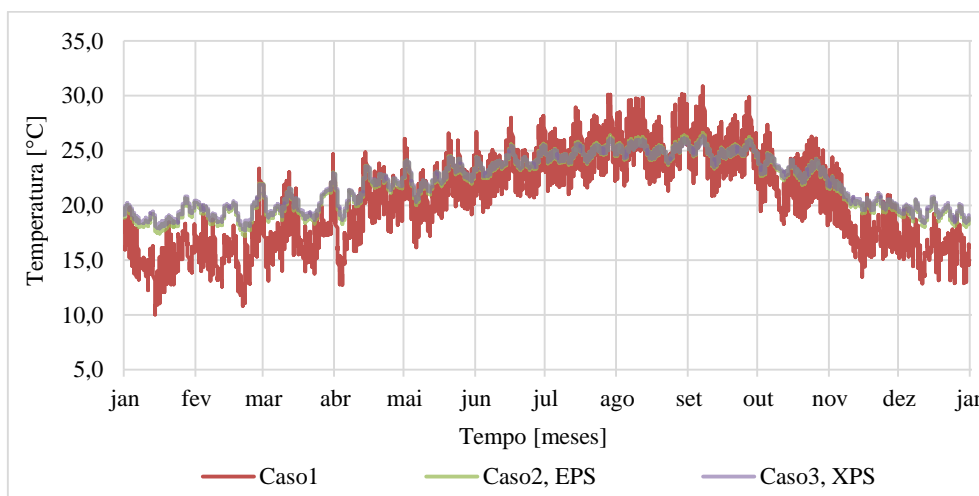


Figura 6.45 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Para a tipologia de elementos construtivos simulados no presente subcapítulo quanto menor for a condutibilidade térmica do isolamento, e consequentemente menor o *coeficiente de transmissão térmica* do elemento construtivo, maior é a temperatura nas camadas posteriores ao isolamento na estação de aquecimento, já que o calor proveniente do clima interior tem maior dificuldade em atravessar o isolamento, e por isso, aumenta a temperatura destas camadas. O caso com XPS tem um menor *coeficiente de transmissão térmica* que o caso com EPS (vd. Fig. E.64, no Anexo E.4), devido à condutibilidade térmica do XPS no estado seco e ao modo como se comporta em relação ao transporte de humidade na fase gasosa, e por isso, a camada de tijolo maciço tem uma maior temperatura durante a estação de aquecimento.

A evaporação tem mais influência no segundo caso que no terceiro caso (vd. Fig. E.65, no Anexo E.4), logo, existe um maior consumo de calor no segundo caso, o que explica o facto da temperatura na camada de tijolo maciço correspondente ao terceiro caso ser superior à temperatura na camada de tijolo maciço do segundo caso.

Conclui-se que nos casos de reabilitação térmica pelo exterior quanto menor for a condutibilidade térmica do isolamento (sendo por isso maior a dificuldade em transporte calor do interior para o exterior) e que quanto maior for a resistência à difusão do isolamento (sendo por isso menos influenciado pela evaporação) maior é a temperatura das camadas posteriores ao isolamento na estação de aquecimento.

#### 6.4.2.2. Comparação entre os três tipos de reboco

A partir da Figura 6.46 verifica-se que as diferenças de temperatura no centro da camada de tijolo maciço entre o segundo caso de estudo com reboco de cal (LP), de cal e cimento (LCP) e de cimento (CP) são praticamente inexistentes. Conclui-se que para o isolamento térmico pelo exterior com poliestireno moldado as camadas de reboco aplicadas na face da camada de tijolo maciço não influenciam de forma significativa a temperatura na camada de tijolo.

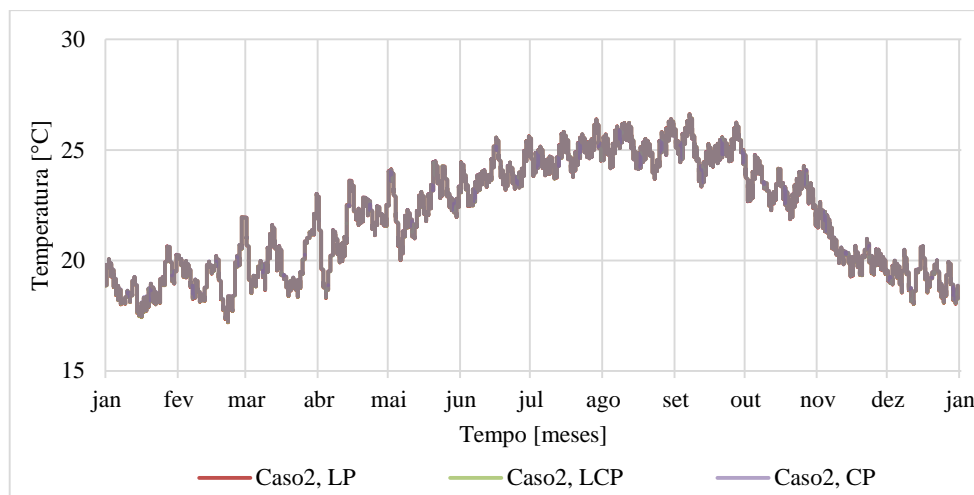


Figura 6.46 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o segundo caso de estudo (EPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

Em relação ao terceiro caso de estudo é possível efectuar a mesma análise, ou seja, que no caso do isolamento térmico pelo exterior com poliestireno extrudido o reboco aplicado em ambas as faces da camada de tijolo maciço não influencia de forma significativa a temperatura dessa mesma camada (vd. Figura 6.47).

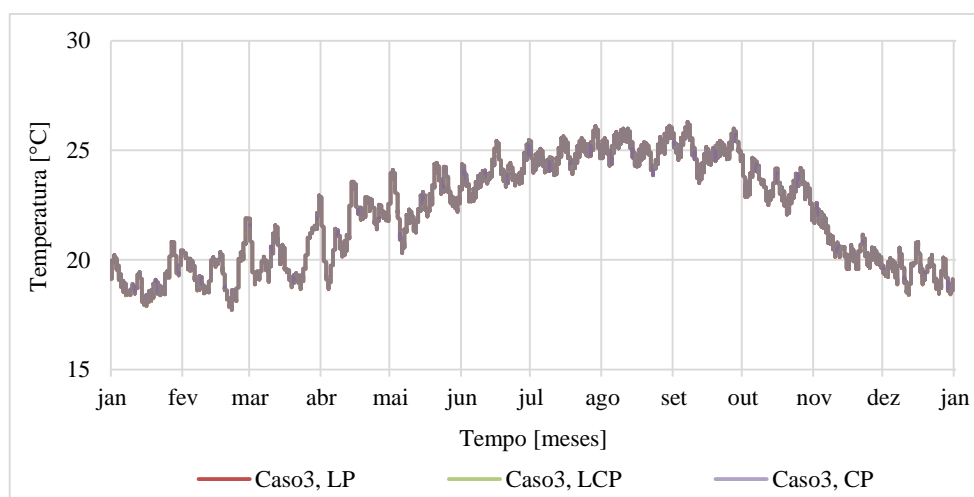


Figura 6.47 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o terceiro caso de estudo (XPS) com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

## 6.5. Estudo sobre variação do coeficiente de transmissão térmica

Analizou-se o grau de diferença do *coeficiente de transmissão térmica* de todos os elementos construtivos simulados na presente dissertação em função da tipologia de regime de cálculo (i.e. permanente e variável). Para tal, foram calculados três *coeficientes de transmissão térmica* distintos:  $U_{ITE}$ ;  $U_{WUFI}$ ; e  $U_{MÉDIO}$ . Foi ainda calculado o aumento do  $U_{MÉDIO}$  em relação ao  $U_{WUFI}$  em termos percentuais.

O  $U_{ITE}$  foi calculado a partir das propriedades dos materiais simulados existentes no ITE 50 [38] (vd. Quadro C.2, no Anexo C) e no ITE 54 [39] (vd. Quadro C.3, no Anexo C). Os cálculos são efectuados considerando regime permanente, e as *resistências térmicas superficiais* adoptadas são as preconizadas pelo ITE 50 [38].

O  $U_{WUFI}$  foi calculado a partir das propriedades dos materiais simulados existentes na biblioteca da versão 4.2 IBP – Pro do WUFI®. Os cálculos são efectuados considerando regime permanente, e as

*resistências térmicas superficiais* adoptadas são as preconizadas pelo WUFI® sem a variação das características do vento (vd. Subcapítulo 4.2.3.1).

O  $U_{\text{MÉDIO}}$  foi calculado a partir da variação das propriedades dos materiais ao longo do intervalo de tempo simulado recorrendo ao programa WUFI®. Este coeficiente é um valor representativo de um ano posterior ao equilíbrio dinâmico. As *resistências térmicas superficiais* adoptadas são as preconizadas pelo WUFI® em função da variação das características do vento (vd. Subcapítulo 4.2.3.1).

O estudo da identificação da importância da camada de tijolo maciço permitiu verificar que quanto maior for a espessura desta camada, maior é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ . Devendo-se ao aumento da dificuldade da camada de tijolo em expelir a humidade do seu interior durante a fase de secagem que está associado ao aumento da espessura (vd. Figura 6.4). Os aumentos variam aproximadamente entre 20 e 36%, e o caso com uma espessura de 45 centímetros corresponde ao caso em que o aumento é mais significativo (vd. Quadro E.9, no Anexo E.5).

O estudo da quantificação da importância das camadas de reboco permitiu verificar que: nos casos em que se aplica apenas reboco exterior quanto mais impermeável à humidade for o reboco, menor é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ ; e nos casos em que se aplica apenas reboco interior quanto mais impermeável à humidade for a camada de reboco, maior é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ . Nos casos com apenas reboco exterior os aumentos variam aproximadamente entre 1 e 14%, sendo o caso com reboco de cal o que tem um aumento mais significativo (vd. Quadro E.10, no Anexo E.5). Nos casos com apenas reboco interior os aumentos variam aproximadamente entre 20 e 24%, sendo o caso com reboco de cimento o que tem um aumento mais significativo (vd. Quadro E.11, no Anexo E.5). Ao aplicar reboco pelo exterior e pelo interior obtém-se uma situação semelhante aos casos em que se aplica apenas reboco pelo exterior mas com valores superiores (vd. Quadro E.12, no Anexo E.5).

Nos casos com isolamento térmico pelo interior verifica-se que: quanto mais impermeável à humidade<sup>97</sup> for a camada de reboco aplicada, menor é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ ; e quanto mais impermeável à humidade no estado gasoso for o isolamento térmico aplicado, maior é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ , com excepção dos casos com XPS. Os aumentos variam aproximadamente entre 1 e 8%, e o caso em que o aumento é mais significativo é o caso com EPS e reboco de cal, com um aumento aproximado de 8% (vd. Quadro E.13 ao Quadro E.15, no Anexo E.5).

Nos casos com isolamento térmico pelo exterior verifica-se que: as diferenças entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$  para reboco de cal e de cal e cimento são idênticas, apenas nos casos com reboco de cimento é que a diferença diminui em relação aos casos com reboco de cal e de cal e cimento; e quanto mais impermeável à humidade no estado gasoso for o isolamento térmico aplicado, menor é a diferença entre o  $U_{\text{WUFI}}$  e o  $U_{\text{MÉDIO}}$ . Os aumentos variam aproximadamente entre 0,1 e 0,4%, e os casos em que o aumento é mais significativo são os casos com EPS e reboco de cal ou reboco de cal e cimento, com um aumento aproximado de 0,4% (vd. Quadro E.16 ao Quadro E.18, no Anexo E.5).

---

<sup>97</sup> Entende-se como material impermeável à humidade um material que é impermeável tanto na fase líquida como na fase gasosa.





## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. Conclusões

O presente trabalho consiste na análise de soluções construtivas em que a camada de suporte é o tijolo maciço. Os estudos realizados referem-se à análise da camada de tijolo maciço: com face à vista; com camada de reboco; com isolamento térmico pelo interior; e com isolamento térmico pelo exterior. Em seguida são apresentadas as principais conclusões.

#### A importância da camada de tijolo maciço

A análise efectuada em relação à camada de tijolo maciço com face à vista permitiu concluir que a quantidade de humidade nesta camada varia devido às condições dos climas fronteira, e que o aumento da quantidade de humidade está directamente relacionado com os períodos de precipitação, o que demonstra o importante contributo desta acção solicitante. O aumento da espessura da camada de tijolo causa a diminuição da quantidade de humidade na fase de humedecimento e o aumento na fase de secagem, sendo estes fenómenos mais pronunciados quanto maior for a espessura. Em relação à importância da chuva incidente nos elementos construtivos também se verifica que varia consoante as condições dos climas fronteira, ocorrendo o desaparecimento da fase de secagem com o aumento da espessura da camada de tijolo.

A chuva incidente é responsável pela diminuição da *temperatura superficial exterior* e da *temperatura superficial interior*. Contudo, enquanto ocorre uma diminuição do fluxo de calor exterior existe um aumento do fluxo interior. Estes fenómenos são mais evidentes na fase de humedecimento do elemento construtivo. O aumento da espessura da camada de tijolo causa uma diminuição dos fluxos de calor exteriores, mais evidente na fase de humedecimento, e uma variação menos pronunciada dos fluxos de calor interiores.

A quantidade de humidade na fase líquida proveniente do exterior influencia o fluxo de difusão e o fluxo capilar. Quer isto dizer que as propriedades do material em relação à humidade tanto na fase gasosa como na fase líquida influenciam o fluxo de difusão. O aumento da espessura da camada de tijolo implica um aumento do fluxo de difusão exterior, nomeadamente na fase de humedecimento, e uma diminuição do fluxo capilar nos intervalos de tempo em que é atingido o *teor de água de saturação* da camada em contacto com o clima exterior no paramento exterior. No clima interior as trocas de humidade apenas ocorrem na fase gasosa, diminuindo à medida que a espessura aumenta.

O calor latente de fusão não influencia os elementos construtivos em Lisboa, já que a humidade não chega a atingir a fase sólida. O calor latente de evaporação é responsável por uma maior quantidade de humidade no elemento construtivo, e pela diminuição da temperatura ao longo do elemento. A chuva incidente é a principal responsável pelo transporte de humidade num elemento construtivo, contudo, existem outros mecanismos que promovem o transporte de humidade no interior de um elemento construtivo.

#### A importância da camada de reboco

A quantidade de humidade na camada de tijolo maciço depende das propriedades das camadas de revestimento em relação ao transporte de humidade. O reboco exterior implica uma variação menos pronunciada do teor de água na camada de tijolo, e o reboco interior implica o aumento do teor de água da camada de tijolo. A magnitude destas ocorrências é tanto mais pronunciada quanto mais impermeável ao vapor de água e à água líquida for o reboco. A aplicação de reboco em ambas as faces implica uma quantidade de humidade no elemento construtivo superior ao caso em que se aplica apenas reboco exterior. O reboco exterior é responsável por uma menor quantidade de humidade no reboco interior. Contudo, o reboco interior não implica alterações significativas no reboco exterior.

O reboco exterior implica a diminuição da temperatura ao longo da camada de tijolo, já que o valor de *factor de absorção de radiação por onda-curta* diminui cerca de 41%. O aumento da quantidade de humidade no elemento construtivo não anula o acréscimo de resistência térmica associado à aplicação

de uma camada de reboco, por isso, uma camada de tijolo rebocada interiormente tem um menor *coeficiente de transmissão térmica* que apenas uma camada de tijolo. Nos elementos com reboco exterior verifica-se que consoante o reboco aplicado a diminuição da temperatura ao longo da camada de tijolo maciço é diferente, sendo tanto menor quanto mais impermeável à humidade for o reboco. Para os elementos com reboco interior verifica-se uma diminuição muito ligeira da temperatura no centro da camada de tijolo maciço durante a fase de secagem, e um aumento ligeiro na fase de humedecimento. Estas ocorrências têm uma maior magnitude quanto mais impermeável à humidade for reboco. Nos elementos rebocados em ambas as faces também se verifica que a temperatura no centro da camada de tijolo é tanto mais elevada quanto mais impermeável à humidade for o reboco.

### **Reabilitação térmica pelo interior**

A aplicação do isolamento térmico implica um aumento do período de tempo necessário para atingir o equilíbrio dinâmico, variando consoante o tipo de isolamento e o tipo de reboco que pode aumentar a quantidade de humidade no elemento construtivo. O reboco de cimento é o único que não implica um aumento da quantidade de humidade. O isolamento é responsável pelo aumento da quantidade de humidade na camada de tijolo maciço, sendo o aumento tanto maior quanto maior for o seu *factor de resistência à difusão de vapor*. Esta constatação é válida para os casos com reboco de cal e com reboco de cal e cimento, no entanto, ocorrem a magnitudes diferentes. O maior aumento está associado ao poliestireno expandido e o menor à lã mineral. Em relação ao reboco de cimento verifica-se que varia o caso em que são obtidos os valores mais elevados de teor de água. Enquanto na fase de humedecimento os valores mais elevados correspondem ao caso com MW, durante a fase de secagem corresponde ao XPS. Retirar a camada de reboco interior aquando da aplicação do isolamento não se justifica, já que as diferenças da quantidade de humidade na camada de tijolo são reduzidas, sendo as diferenças tanto menores quanto maior for o *factor de resistência à difusão de vapor* do isolamento. Esta afirmação é válida para os casos com as três argamassas analisadas.

A aplicação de isolamento térmico pelo interior é responsável pela diminuição da temperatura da camada de tijolo maciço durante a estação de aquecimento e pelo aumento da temperatura durante a estação arrefecimento. Estas ocorrências são tanto mais pronunciadas quanto maior for a resistência térmica do isolamento. Nos casos analisados os valores mais elevados foram atingidos para o caso com XPS. Em relação ao tipo de reboco aplicado verifica-se que a temperatura interior é tanto mais elevada quanto mais impermeável à humidade for a camada de reboco. O reboco de cimento atingiu os valores mais elevados, já que é o menos influenciado pela evaporação.

### **Reabilitação térmica pelo exterior**

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior implica uma redução enorme da quantidade de humidade proveniente do exterior nas camadas posteriores ao isolamento. Esta redução deve-se em primeiro lugar às propriedades do reboco sintético em relação à humidade, e em segundo lugar às propriedades dos isolamentos térmicos em relação à humidade na fase gasosa. Estas ocorrências são mais pronunciadas quanto mais impermeável à humidade na fase gasosa for o isolamento. O tipo de reboco aplicado nas faces da camada de tijolo maciço não implica diferenças assinaláveis, e em relação a conservar as camadas de reboco em ambas as faces ou apenas retirar a camada de reboco exterior aquando da aplicação do sistema de isolamento verificou-se que as diferenças são mínimas em relação ao caso em que não é aplicado reboco, logo, não se justifica retirar qualquer uma das camadas de reboco. Na camada de tijolo maciço verifica-se uma alternância da fase de humedecimento com a fase de secagem. Na fase de secagem o teor de água mais elevado é atingido para o caso com reboco de cimento e na fase de humedecimento para o caso com reboco de cal.

Conclui-se que para o caso do isolamento térmico pelo exterior a importância do reboco é mínima, contudo, no caso do isolamento pelo interior o reboco exterior é muito importante, já que as suas propriedades influenciam significativamente a quantidade de humidade no elemento construtivo.

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior implica uma variação menos pronunciada da temperatura na camada de tijolo maciço, e valores de temperatura superiores na estação de aquecimento. Quanto mais elevado for a resistência térmica e a resistência à difusão de vapor do isolamento, mais elevada será a temperatura na camada de tijolo durante a estação de aquecimento. As camadas de reboco

aplicadas nas faces da camada de tijolo não implicam diferenças assinaláveis na temperatura. Esta constatação é válida tanto para os casos com isolamento térmico de EPS como para os casos com XPS.

### **Variação do coeficiente de transmissão térmica**

O coeficiente de transmissão térmica calculado recorrendo aos *outputs* do programa WUFI® (i.e. em regime variável) apresenta um aumento em relação ao mesmo coeficiente calculado em regime permanente, uma vez que a influência da humidade é contabilizada. No entanto, a magnitude deste aumento depende da constituição do elemento construtivo. Ao aumento da espessura da camada de tijolo simulada está associado um aumento entre 20 e 36%. Nos casos com reboco exterior existe um aumento entre 1 e 14%, e nos casos com reboco interior um aumento entre 20 e 24%. A magnitude do aumento é tanto maior quanto mais impermeável à humidade for o reboco. Nos casos com isolamento térmico pelo interior existe um aumento entre 1 e 8%, e nos casos com isolamento térmico pelo exterior o aumento é entre 0,1 e 0,4%.

## **7.2. Sugestões para desenvolvimentos futuros**

Ao longo do presente trabalho houve aspectos que não foram abordados, devido a certos condicionalismos, mas que seria interessante aprofundar. Em seguida são referidos alguns desses aspectos que podem constituir temas para futuras investigações.

Os materiais que se encontram caracterizados na biblioteca do programa WUFI® possibilitam realizar a mesma análise que foi efectuada na presente dissertação relativamente a paredes simples de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado e em relação a paredes simples de alvenaria de pedra seca – calcário.

O facto de terem sido utilizados materiais caracterizados na biblioteca do programa WUFI®, de forma que fossem contabilizados todos os fenómenos higrotérmicos passíveis de serem simulados pelo programa nas simulações efectuadas, é um condicionalismo, já que os materiais utilizados são referentes ao mercado alemão e o trabalho desenvolvido é referente a Portugal, logo, os materiais deviam ser referentes ao mercado português. Por isso, recomenda-se uma caracterização dos materiais comercializados em Portugal de modo a que futuros trabalhos que recorram ao programa WUFI® sejam ainda mais enquadrados com a realidade portuguesa.

O facto do clima de Lisboa ser a única opção do programa em relação ao clima português constitui um condicionalismo. Por isso, recomenda-se a construção de ficheiros climáticos para outras regiões do País de modo a ser possível simular soluções construtivas nessas regiões.

A impossibilidade de contabilizar o arrefecimento nocturno nas simulações efectuadas com o ficheiro climático de Lisboa é uma menos-valia para os resultados obtidos. Por isso, recomenda-se uma caracterização da radiação atmosférica e do índice de nuvens (i.e. *cloud index*) de modo a possibilitar a contabilização deste fenómeno nas simulações efectuadas em relação ao clima de Lisboa.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE) – Standard 160P – *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*. Atlanta, ASHRAE, September 2008.
- [2] CHANG, S.C.; HUTCHEON, N.B. – *Dependence of Water Vapour Permeability on Temperature and Humidity*. ASHRAE Journ. Sect. Heating, Piping & Air Conditioning 28 (1956), H.3, S. 149-155.
- [3] BARREIRO, E. *et al.* – *Exterior condensation on façades: numerical simulation of the undercooling phenomenon*. Journal of Building Performance Simulation, 6:5, 337-345. Taylor & Francis, 2013.
- [4] BLOCKEN, B.; CARMILLET, J. – *A review of wind-driven rain research in building science*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 92, 1079-1130. Elsevier, 2004.
- [5] DECRETO-LEI nº 53/2014. Diário da República, 1ª série nº 69 (8 de Abril de 2014) págs. 2337-2340.
- [6] DECRETO-LEI nº 118/2013 – *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação: REH*. Diário da República, 1ª série nº 159 (20 de Agosto de 2013).
- [7] DECRETO-LEI nº 38382 – *Regulamento Geral das Edificações Urbanas: RGEU*. Diário do Governo, 1ª série nº 166 (7 de Agosto de 1951).
- [8] DESPACHO (EXTRATO) nº 15793-F/2013. Diário da República, 2ª série nº 234 (3 de Dezembro de 2013), pág. 35088-(26) à 35088-(31).
- [9] DESPACHO (EXTRATO) nº 15793-K/2013. Diário da República, 2ª série nº 234 (3 de Dezembro de 2013), pág. 35088-(67).
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) – DIN 4108-3:2014-11 – *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung (Thermal protection and energy economy in buildings – Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions – Requirements and directions for design and construction)*. DIN, November 2014.
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) – DIN 52615:1987-11 – *Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen (Determination of water vapour permeability in building materials and insulation products)*. DIN, November 1987.
- [12] *Deutscher Wetterdienst: Aspirationspsychrometer-Tafeln (German Weather Service: Aspiration psychrometer tables)*. 5. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1976.
- [13] EUROPEAN STANDARD FOR STANDARDISATION (CEN) – EN 12524:2000 – *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values*. Brussels: CEN, April 2000.
- [14] EUROPEAN STANDARD FOR STANDARDISATION (CEN) – EN 15026:2007 – *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. Brussels: CEN, April 2007.
- [15] EUROPEAN STANDARD FOR STANDARDISATION (CEN) – EN ISO 13788:2001 – *Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*. Brussels: CEN, July 2001.
- [16] FREITAS, V.; ALVES, S. – *Parede Exterior – Termoforese: APARECIMENTO DE MANCHAS EM FACHADAS, Ficha B11B*. PATORREB, FEUP, APPAC.
- [17] FREITAS, V.; TORRES, M.; GUIMARÃES, A. – *Humidade Ascensional*. Porto: FEUP, 2008. ISBN 978-972-752-101-2.

- [18] FREITAS, V. – *Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios: Análise do fenómeno de Interface*. Porto: FEUP, 1992.
- [19] HENRIQUES, F. – *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa: UNL-FCT, 2015. ISBN 978-989-20-3993-0.
- [20] HENRIQUES, F. – *Humidade em Paredes*. Lisboa: LNEC, 2007. ISBN 978-972-49-1592-0.
- [21] HENRIQUES, F. – *Quantification of Wind Driven Rain: An Experimental Approach*. Building Research and Information. 20: 295-297. 09/1992.
- [22] HETTMANN, D. – *Zur Beeinflussung des Feuchte- und Salzgehaltes in Mauerwerk (Effect of the moisture and salt content in masonry)*. Baustenschutz + Bausanierung 16 (1993), H. 5, S. 72-75.
- [23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 15927-3 – *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data*. Geneva, ISO, 2009.
- [24] JORNE, F. – *Análise do Comportamento Higrotérmico de Soluções Construtivas de Paredes em Regime Variável*. Dissertação obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil. Monte de Caparica: UNL-FCT, 2010.
- [25] KAST, W; JOKISCH, F. – *Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen and zur Sorptionskinetik and porösen Feststoffen (Considerations regarding the development of sorption isotherms and the sorption kinetics in porous solids)*. Chemie-Ingenieur-Technik 44 (1972), H. 8, S. 556-563.
- [26] KEHRER, M.; KÜNZEL, H.; SCHMIDT, T.; ZIRKELBACK, D. – *WUFI® Pro – Manual*.
- [27] KRUS, M. – *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials: Theoretical Principles and New test Methods*. Verlag Suttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1996. ISBN 3-8167-4535-0.
- [28] KRUS, M.; KIEBL, K. – *Determination of the moisture storage characteristics of porous capillary active materials*. Materials and Structures, Volume 31, nº 8, págs. 522-529. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [29] KÜNZEL, H. – *Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls*. Materials and Structures, Volume 31, nº 2, págs. 99-103. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [30] KÜNZEL, H. – *Feuchteeinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit bei hygroskopischen und nicht hygroskopischen Stoffen (The moisture effect on the thermal conductivity of hygroscopic and non-hygroscopic materials)*. WKS 36 (1991), H. 29, S. 15-18.
- [31] KÜNZEL, H. – *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and Two dimensional calculation using simple parameters*. Verlag Suttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995. ISBN 3-8167-4103-7.
- [32] KÜNZEL, H. – *Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe (Relationship between the moisture of outdoor building components in practice and the sorption characteristics of the building materials)*. Bauphysik 4 (1982), H.3, S. 101-107.
- [33] KÜNZEL, H. et al. – *Rain Protection of Stucco Facades*. ASHRAE, 2004.
- [34] PORTARIA nº 379-A/2015. Diário da República, 1ª série nº 207 (22 de Outubro de 2015), pág. 9196-(14) à 9196-(17).
- [35] PRODATA – *Altitude máxima nos Municípios*. Disponível em: <http://www.pordata.pt/Municipios/Altitude+m%C3%A1xima-50>. Acedido em Setembro de 2015.

- [36] RODE, C. – *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. Diss. Technical University of Denmark (1990).
- [37] RIBEIRO, P. – *Análise Comparativa de Diferentes Modelos de Simulação Numérica na Avaliação da Ocorrência de Condensações Internas*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Monte de Caparica: UNL-FCT, 2013.
- [38] SANTOS, C.; MATIAS, L. – *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos edifício – ITE 50*. Lisboa: LNEC, 2014. ISBN 978-972-49-2065-8.
- [39] SANTOS, C.; RODRIGUES, R. – *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Opacos da Envolvente dos Edifícios: Soluções Construtivas de edifícios antigos, Soluções construtivas das Regiões Autónomas – ITE 54*. Lisboa: LNEC, 2012. ISBN 978-972-49-2180-8.
- [40] SCHASCHEK, H. – *Bewegungsmechanismus von Wasserdampf in porösen blattförmigen Materialien (The transport mechanism of water vapour in porous leaf-shaped materials)*. Chemie-Ingenieur-Technik 28 (1956), H. 11, S. 698-702.
- [41] SCHMIDT, T. – *On-line Help for WUFI Pro 4.2*. Verlag Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 2008.
- [42] VEIGA, M.; MALANHO, S. – *Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS): Comportamento global e influência dos componentes*. APFAC 2010, 18-19/03/2010.
- [43] WUFI Fórum. Disponível em <http://www.wufi-forum.com/>. Acedido em 2015.





## **ANEXOS**



## Anexo A – Dados a introduzir no programa WUFI®

Quadro A.1 – Simbologia dos processos de transporte de humidade utilizada na verificação da qualidade da malha numérica

Símbolo	Designação
kl	Quantidade de água transportada por condução capilar no lado esquerdo
dl	Quantidade de água transportada por difusão de vapor de água no lado esquerdo
kr	Quantidade de água transportada por condução capilar no lado direito
dr	Quantidade de água transportada por difusão de vapor de água no lado direito

Quadro A.2 – Lista de camadas que o programa tem na biblioteca para o clima exterior e interior, e respectiva espessura da camada de ar de difusão equivalente

Camada	S <sub>d</sub> [m]	Clima exterior	Clima interior
<i>Aluminium Siding (incl. Rebate)</i>	50,0	✓	-
<i>Bituminous Felt and Alu</i>	1 000,0	✓	-
<i>Bituminous Felt and PVC</i>	300,0	✓	-
<i>Gypsum Board</i>	0,1	-	✓
<i>Gypsum Plaster</i>	0,1	-	✓
<i>Kraft Paper with Gypsum Board</i>	3,0	✓	✓
<i>Lathed Ceiling</i>	0,8	-	✓
<i>Metal Foil</i>	10 000,0	✓	✓
<i>PE-Film with Gypsum Board</i>	10,0	-	✓
<i>Stucco, acrylic (without Driving Rain)</i>	1,0	✓	-
<i>Stucco, min. (without Driving Rain)</i>	0,1	✓	-
<i>Tiles</i>	2,0	✓	✓
<i>Vapor Barrier</i>	100,0	-	✓

Quadro A.3 – Valor médio anual da temperatura, valor da amplitude e o dia a que corresponde o valor máximo da temperatura, consoante o clima

Clima	Valor médio	Amplitude	Dia do valor máximo
	[°C]	[°C]	
Interior	21	1	03/06/2015
Exterior <sup>98</sup>	9	9	15/07/2015

Quadro A.4 – Valor médio anual da humidade relativa, valor da amplitude e o dia a que corresponde o valor máximo da humidade relativa, consoante o clima

Clima	Carga de humidade	Valor médio	Amplitude	Dia do valor máximo
		[%]	[%]	
Interior	Baixa	45	15	16/08/2015
	Média	50	10	16/08/2015
	Alta	55	5	16/08/2015
Exterior <sup>98</sup>	-	80	8	15/12/2015

<sup>98</sup> Os valores do clima exterior são referentes ao clima exterior Alemão [41].

Quadro A.5 – Tipo de edifícios que corresponde a cada classe de humidade na norma EN ISO 13788:2001, retirado de [15]

Classe de humidade	Tipologia de edifício
1	Armazéns
2	Escritórios, lojas
3	Habitações com reduzida ocupação
4	Habitações com elevada ocupação, pavilhões desportivos, cozinhas, cantinas; edifícios aquecidos com aquecimentos com gás
5	Edifícios especiais (e.g. lavandarias, piscinas, destilarias)

Quadro A.6 – Tipo de edifícios que corresponde a cada nível de carga de humidade na norma EN 15026:2007, retirado de [14]

Níveis de carga de humidade	Tipologia de edifício
Média	Habitações - com ocupação normal
Alta	Escritórios - com ocupação elevada

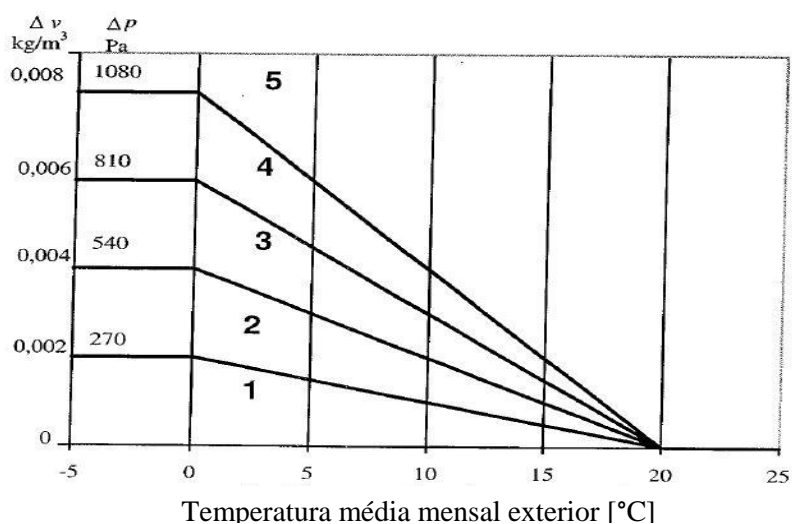


Fig. A.1 – Variação das classes de humidade referentes ao clima interior em função da temperatura exterior, retirado de [15]

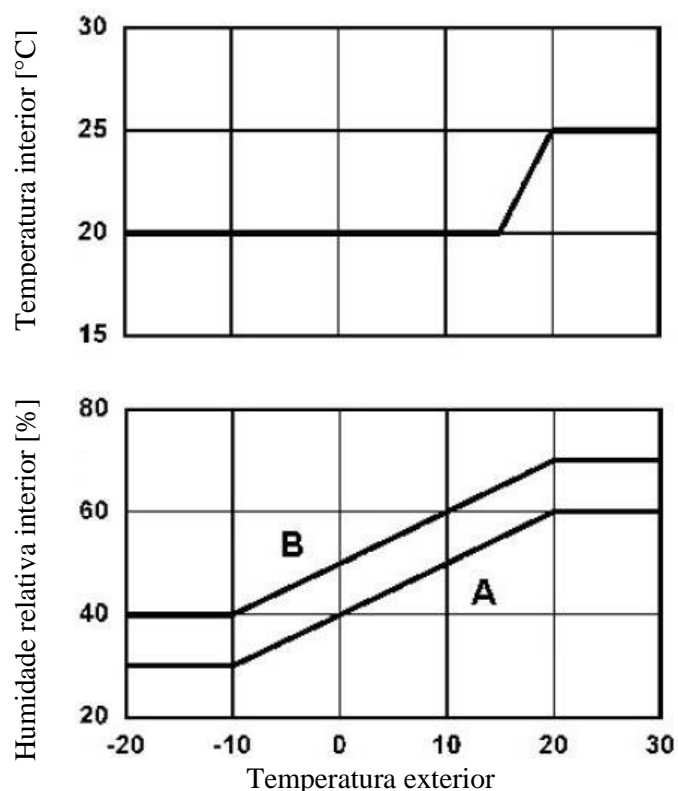


Fig. A.2 – Valor médio diário da temperatura interior e da humidade relativa, consoante o tipo de edifício, em função do valor médio diário da temperatura exterior, retirado de [14]

Quadro A.7 – Simbologia utilizada num ficheiro climático do tipo WAC, adoptado de [43]

Símbolo	Significado	Unidade
ISGH	Global Horizontal Radiation, short-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ISDH	Direct Horizontal Radiation, short-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ISD	Diffuse Radiation, short-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ILAH	Atmospheric Counter Horizontal Radiation, long-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ILTH	Terrestrial Counter Horizontal Radiation, long-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ISM	Measured Radiation, short-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
ILM	Measured Radiation, long-wave	[W/m <sup>2</sup> ]
CI	Cloud Index	[-]
WV	Wind Velocity, vect. Average	[m/s]
WS	Wind Speed, skal. Average	[m/s]
WD	Wind Direction <sup>99</sup>	[°]
RN	Normal Rain	[mm/h], [l/m <sup>2</sup> .h]
RM	Measured Rain	[mm/h], [l/m <sup>2</sup> .h]
TA	Air Temperature	[°C]
HREL	Relative Humidity	[-]
PSTA	Air Pressure at Station Height	[hPa]
PMSL	Air Pressure at MSL	[hPa]

<sup>99</sup> Assume-se Norte como ponto inicial.



## Anexo B – Clima em Portugal

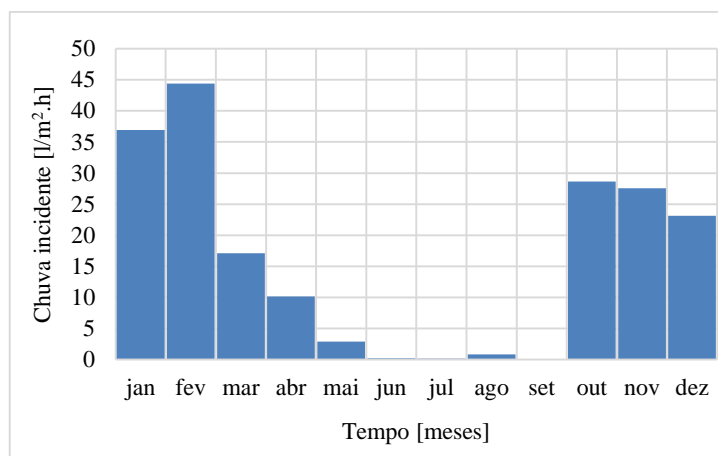


Fig. B.1 – Quantidade de chuva incidente por cada mês do ano de referência

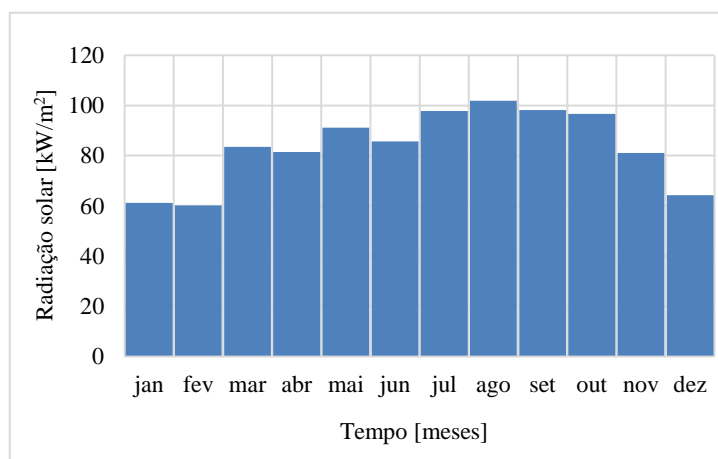


Fig. B.2 – Quantidade de radiação solar por cada mês do ano de referência para Sudoeste





## Anexo C – Soluções construtivas simuladas

Quadro C.1 – Valores de altitude e de graus-dias referência, mínimos e máximos

Altitude (z)			Graus-Dias (GD)			
Referência	Mínimo	Máximo	Referência	a	Mínimo	Máximo
[km]	[km]	[km]	[°C]	[°C/km]	[°C]	[°C]
0,109	0,000	0,227	1071,0	1700,0	885,7	1271,6

Quadro C.2 – Propriedades dos materiais que compõem as soluções construtivas simuladas, valores consultados no ITE 50 [38]

Materiais		Propriedades	
		Massa volúmica aparente	Condutibilidade térmica
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/m.K]
Argamassa	Cal	1800-2000	1,30
	Cimento		
	Cal e cimento	1600	0,80
	Sintético	1100	0,55
Isolamento térmico	EPS	15-20	0,040
	MW	60	0,040
	ICB	150	0,045
	XPS	40	0,037
Placas de gesso cartonado		750-1000	0,25

Quadro C.3 – Resistência térmica em função da espessura da camada de tijolo maciço, valores consultados no ITE 54 [39]

Material	Espessura	Resistência térmica
	[m]	[m <sup>2</sup> .K/W]
Tijolo maciço	0,22	0,29
	0,34	0,44
	0,45	0,59

Quadro C.4 – Resistência térmica total e coeficiente de transmissão térmica em função do tipo de reboco aplicado no elemento construtivo

Elementos construtivos <sup>100</sup>	R <sub>T</sub>	U
	[m <sup>2</sup> .K/W]	[W/m <sup>2</sup> .K]
Reboco de cal	0,363	1,88
Reboco de cal e cimento	0,378	1,83
Reboco de cimento	0,363	1,88

<sup>100</sup> Os elementos construtivos são rebocados em ambas as faces e têm em conta o contributo da camada de gesso cartonado.

Quadro C.5 – Espessura mínima e espessura recomendada do isolamento térmico EPS, segundo a Portaria nº 379-A/2015 [34]

Camada de tijolo maciça	Espessura mínima	Espessura recomendada
	[cm]	[cm]
1 vez	1,0	6,0
1 ½ vez	-	6,0
2 vezes	-	5,0

Quadro C.6 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica para um isolamento térmico pelo interior, valores consultados no ITE 50 [38] e no ITE 54 [39]

Material	Espessura	Condutibilidade térmica	Resistência térmica
	[m]	[W/m.K]	[m².K/W]
Reboco de cimento	0,0150	1,300	0,012
Tijolo maciço	0,2200	-	0,290
Reboco de cimento	0,0150	1,300	0,012
EPS	0,0400	0,040	1,000
Gesso cartonado	0,0125	0,250	0,050
Espessura total	0,3025	$R_T$ [m².K/W]	1,363
Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]			0,65

Quadro C.7 – Cálculo do coeficiente de transmissão térmica para um isolamento térmico pelo exterior, valores consultados no ITE 50 [38] e no ITE 54 [39]

Material	Espessura	Condutibilidade térmica	Resistência térmica
	[m]	[W/m.K]	[m².K/W]
Reboco sintético	0,0020	0,700	0,004
EPS	0,0400	0,040	1,000
Reboco cimento	0,0150	1,300	0,012
Tijolo maciço	0,2200	-	0,290
Reboco cimento	0,0150	1,300	0,012
Espessura total	0,2500	$R_T$ [m².K/W]	1,317
Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]			0,67

Quadro C.8 – Propriedades básicas do poliestireno expandido superficial

Tipo de propriedades	Propriedades	Unidades	Poliestireno expandido superficial
Básicas	Massa volúmica [ $\rho$ ]	[kg/m³]	40,0
	Porosidade [ $\Psi$ ]	[m³/m³]	0,95
	Calor específico do material seco [ $c_s$ ]	[J/kg.K]	1500,0
	Condutibilidade térmica do material seco [ $\lambda_0$ ]	[W/m.K]	0,030
	Factor de resistência à difusão de vapor [ $\mu$ ]	[-]	450,0

## Anexo D – Inputs das simulações efectuadas

Quadro D.1 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada de tijolo maciço a uma vez

Component	Assembly/Monitor Positions	Solid Brick Masonry (22 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,68 (Brick, red)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8
		Initial Temperature in Component [°C]		20,0
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 a 01/01/2020	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
		Adaptive Time Step Control	No	
	Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;	
Indoor		EN 15026:2007	Normal Moisture Load	

Quadro D.2 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco exterior de cal

Component	Assembly/Monitor Positions	Lime Plaster(1,5 cm) + Solid Brick Masonry (22 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,40 (Stucco, normal bright)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8	
	Initial Temperature in Component [°C]		20,0	
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 – 01/01/2018	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
		Adaptive Time Step Control	No	
Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;		
	Indoor	EN 15026:2007	Normal Moisture Load	

Quadro D.3 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco interior de cal

Component	Assembly/Monitor Positions	Solid Brick Masonry (22 cm) + Lime Plaster(1,5 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,68 (Brick, red)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8
		Initial Temperature in Component [°C]		20,0
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 – 01/01/2018	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
		Adaptive Time Step Control	No	
	Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;	
Indoor		EN 15026:2007	Normal Moisture Load	

Quadro D.4 – Inputs adoptados no programa WUFI® para simulação com camada reboco de cal em ambas as faces

Component	Assembly/Monitor Positions	Lime Plaster(1,5 cm) + Solid Brick Masonry (22 cm) + Lime Plaster(1,5 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,40 (Stucco, normal bright)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8
		Initial Temperature in Component [°C]		20,0
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 – 01/01/2018	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
	Adaptive Time Step Control	No		
Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;		
	Indoor	EN 15026:2007	Normal Moisture Load	

Quadro D.5 – Inputs adoptados no programa WUFI® para as simulações de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces

Component	Assembly/Monitor Positions	Lime Plaster(1,5 cm) + Solid Brick Masonry (22 cm) + Lime Plaster(1,5 cm) + Thermal insulation (4,0 cm) + Gypsum Board (1,25 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,40 (Stucco, normal bright)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8
		Initial Temperature in Component [°C]		20,0
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 – 01/01/2022	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
	Adaptive Time Step Control	No		
Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;		
	Indoor	EN 15026:2007	Normal Moisture Load	
Thermal insulation – EPS/MW/ICB/XPS				

Quadro D.6 – Inputs adoptados no programa WUFI® para as simulações de reabilitação térmica pelo exterior com reboco de cal em ambas as faces

Component	Assembly/Monitor Positions	Resin Finishing Coat (0,2 cm) + Thermal insulation (4,0 cm) + Lime Plaster(1,5 cm) + Solid Brick Masonry (22 cm) + Lime Plaster(1,5 cm)		
	Orientation	Orientation	South-West	
		Inclination [°]	90	
		Building Height [m]	Short Building, height up to 10 m	
		Driving Rain Coefficient	R1 [-]	0,00
	R2 [s/m]		0,07	
	Surface Transfer Coefficient	Exterior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,0588
			Wind-Dependent	Yes
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
			Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,40 (Stucco, normal bright)
			Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,90
			Rain Water Absorption Factor [-]	0,70
		Interior Surface	Heat Resistance [m².K/W]	0,125
			S <sub>d</sub> - Value [m]	No coating
	Initial Conditions	Initial Moisture in Component [-]	Constant Across Component	0,8
		Initial Temperature in Component [°C]		20,0
Control	Calculation Period/Profiles	Calculation Period	01/01/2015 – 01/01/2021	
		Time Steps [h]	1	
	Numerics	Mode of Calculation	Heat Transport Calculation	Yes
			Moisture Transport Calculation	Yes
		Hygrothermal Special Options	Excluding Capillary Conduction	No
			Excluding Latent Heat of Evaporation	No
			Excluding Latent Heat of Fusion	No
		Numerical Parameters	Increased Accuracy	Yes
			Adapted Convergence	Yes
	Adaptive Time Step Control	No		
Climate	Outdoor	Lisbon – <u>Longitude</u> : 9,13° West; <u>Latitude</u> : 38,77° North; <u>Altitude</u> : 110 m;		
	Indoor	EN 15026:2007	Normal Moisture Load	
Thermal insulation – EPS/XPS				



## **Anexo E – Simulação em Parede simples de Alvenaria de tijolo maciço**



### Anexo E.1. Alteração da espessura da camada de tijolo maciço

Quadro E.1 – Fluxo de humidade, de difusão e capilar anuais para o clima exterior e o interior relativamente à simulação com chuva incidente do primeiro caso de estudo

Ano	1º Caso - com WDR					
	Clima Exterior - Fluxo [kg/m <sup>2</sup> ]			Clima Interior - Fluxo [kg/m <sup>2</sup> ]		
	Humidade	Difusão	Capilar	Humidade	Difusão	Capilar
2015	23,9	-87,8	111,6	13,2	13,2	0,0
2016	18,4	-91,3	109,7	18,4	18,4	0,0
2017	18,4	-91,3	109,7	18,4	18,4	0,0
2018	18,4	-91,3	109,7	18,4	18,4	0,0
2019	18,4	-91,3	109,7	18,4	18,4	0,0
Total	97,51	-452,95	550,47	86,83	86,83	0,00

Quadro E.2 – Fluxo de humidade, de difusão e capilar anuais para o clima exterior e o interior relativamente à simulação sem chuva incidente do primeiro caso de estudo

Ano	1º Caso - sem WDR					
	Clima Exterior - Fluxo [kg/m <sup>2</sup> ]			Clima Interior - Fluxo [kg/m <sup>2</sup> ]		
	Humidade	Difusão	Capilar	Humidade	Difusão	Capilar
2015	-1,9	-1,9	0,0	0,7	0,7	0,0
2016	-0,6	-0,6	0,0	-0,6	-0,6	0,0
2017	-0,6	-0,6	0,0	-0,6	-0,6	0,0
2018	-0,6	-0,6	0,0	-0,6	-0,6	0,0
2019	-0,6	-0,6	0,0	-0,6	-0,6	0,0
Total	-4,20	-4,20	0,00	-1,59	-1,59	0,00

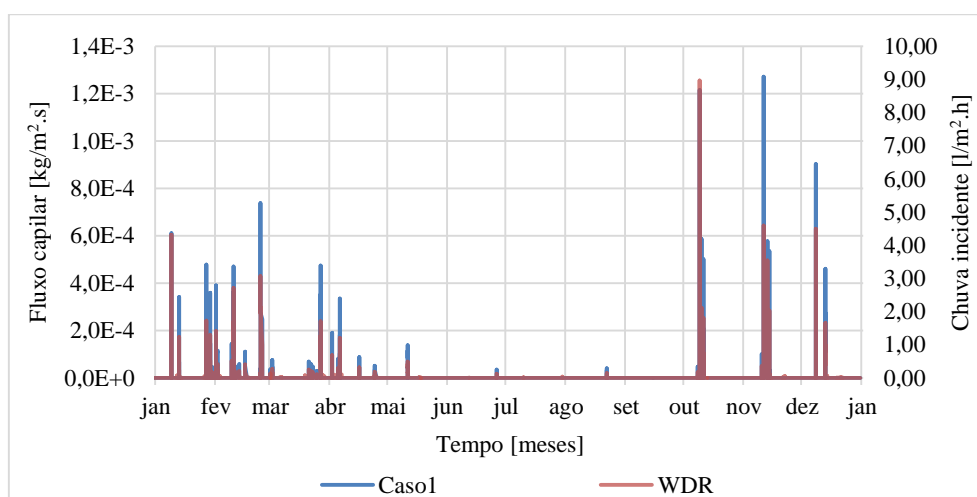


Fig. E.1 – Variação do fluxo capilar para o primeiro caso de estudo e da chuva incidente. A chuva incidente foi multiplicada pelo factor  $a_r$ . Tom de vermelho forte é indicativo de sobreposição

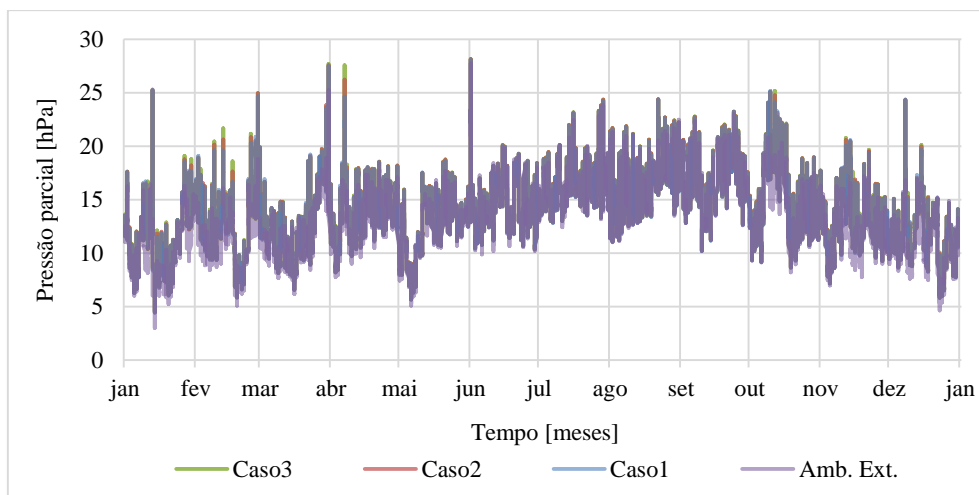


Fig. E.2 – Variação da pressão parcial de vapor de água do paramento exterior para o terceiro, o segundo e o primeiro casos de estudo, e para o meio ambiente exterior. Tom forte é indicativo de sobreposição

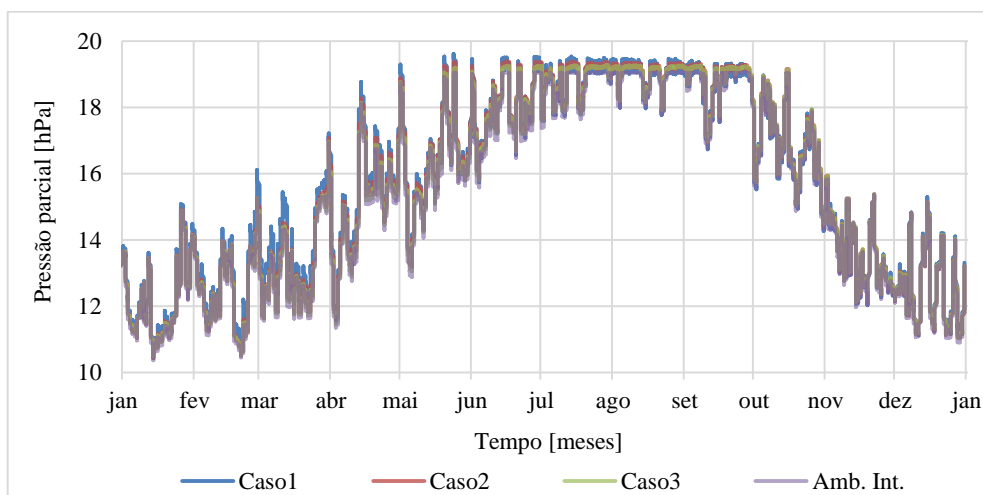


Fig. E.3 – Variação da pressão parcial de vapor de água do paramento interior para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo, e para o meio ambiente interior. Tom forte é indicativo de sobreposição

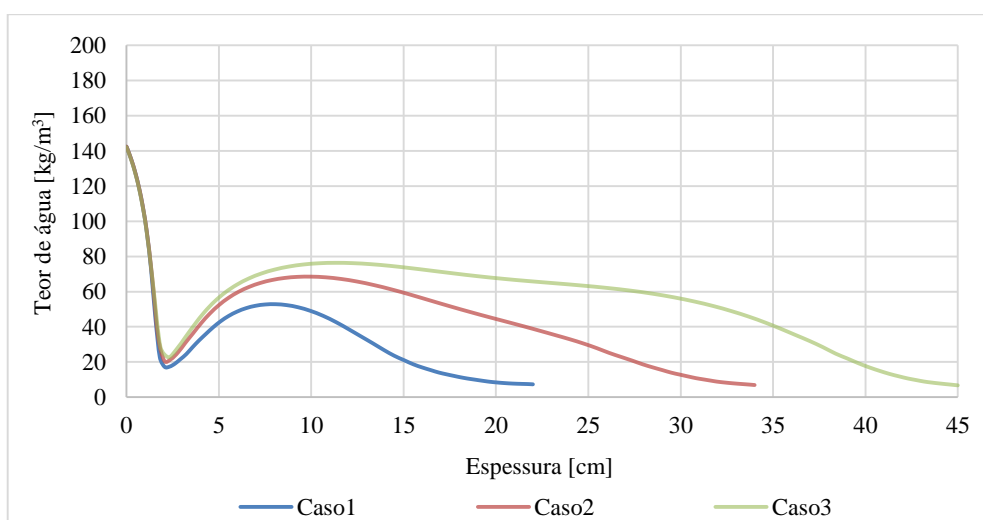


Fig. E.4 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às cinco da manhã. Tom forte é indicativo de sobreposição

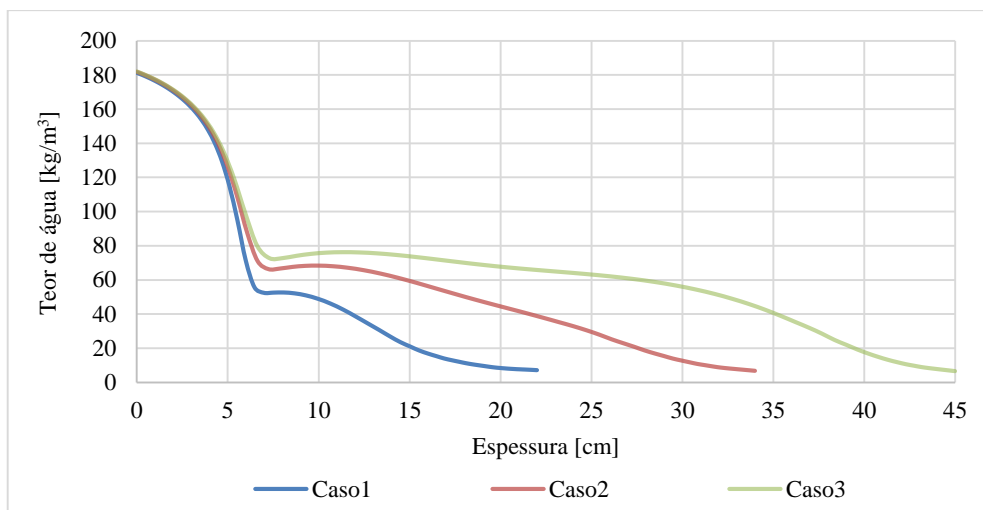


Fig. E.5 – Teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para os três casos no dia 11/11/2018 às sete da manhã. Tom forte é indicativo de sobreposição

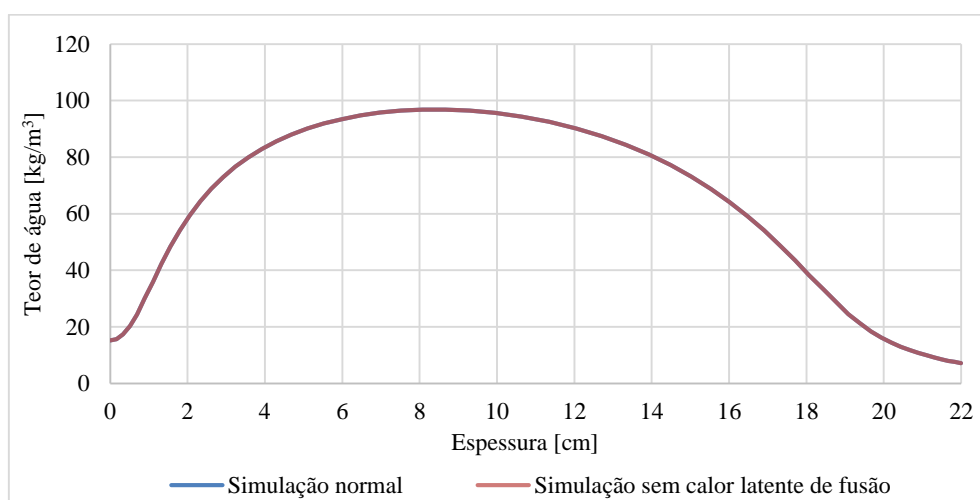


Fig. E.6 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de fusão. Tom forte é indicativo de sobreposição

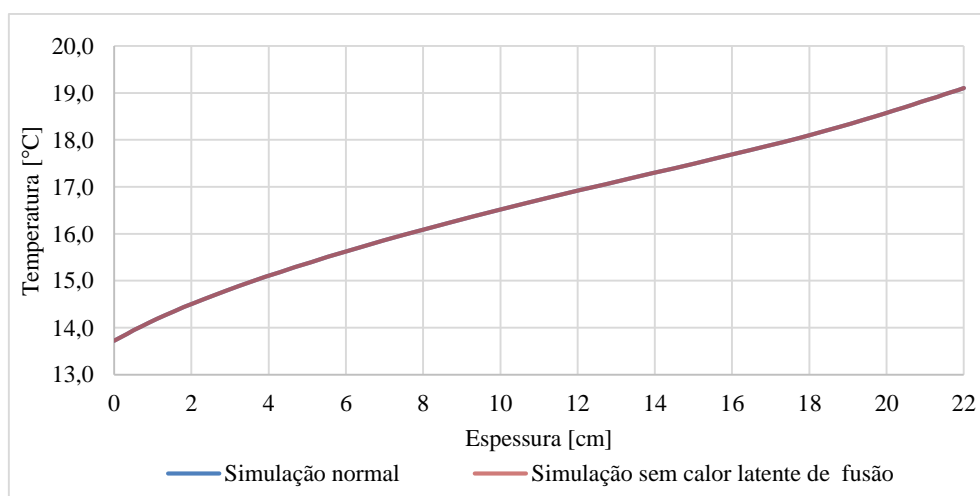


Fig. E.7 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de fusão. Tom forte é indicativo de sobreposição

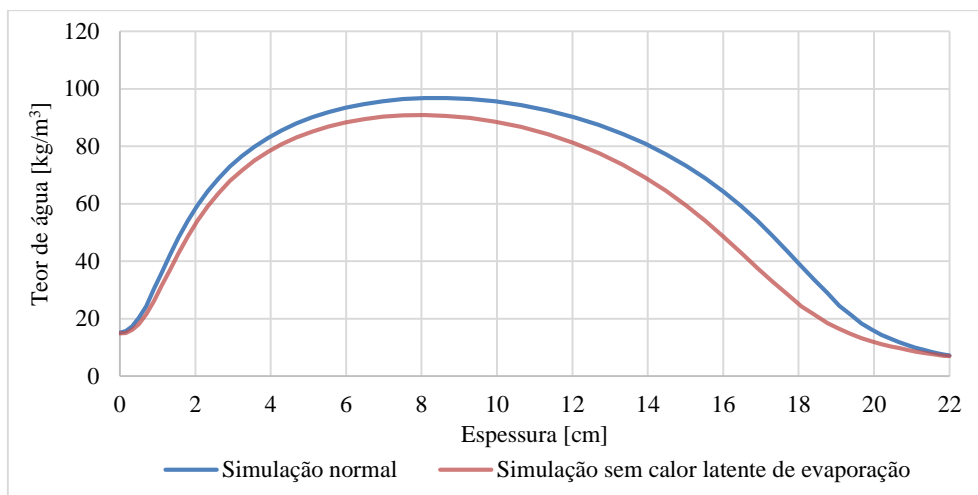


Fig. E.8 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação caso de estudo padrão e à simulação sem calor latente de evaporação. Tom forte é indicativo de sobreposição

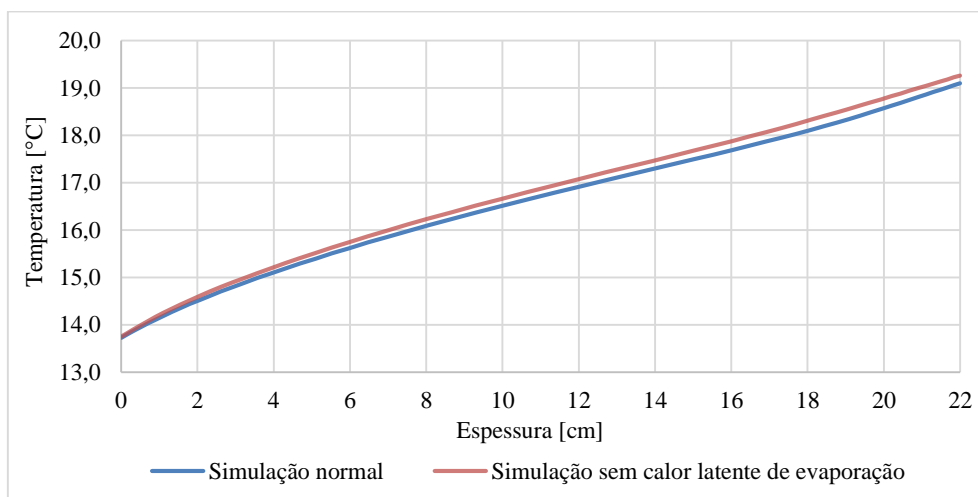


Fig. E.9 – Variação da temperatura ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão e à simulação sem calor latente de evaporação. Tom forte é indicativo de sobreposição

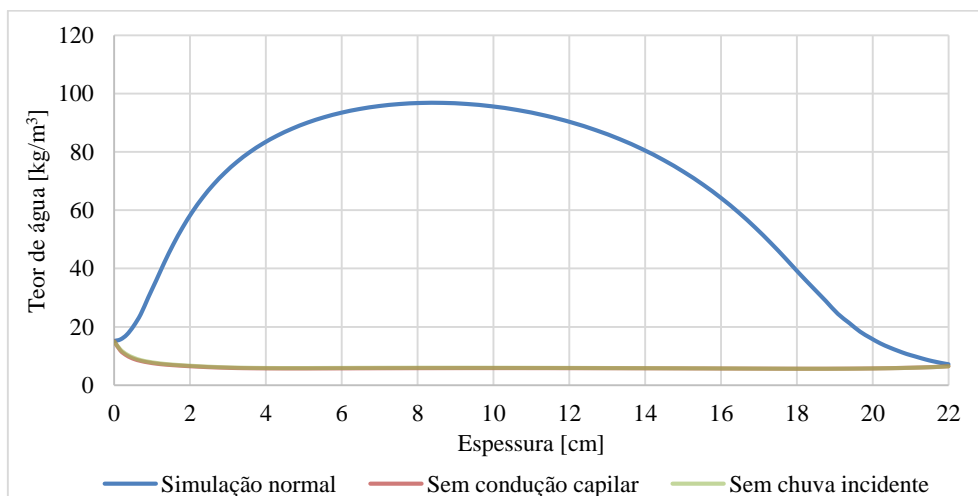


Fig. E.10 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação do caso estudo padrão, à simulação sem condução capilar e à simulação sem chuva incidente. Tom forte é indicativo de sobreposição

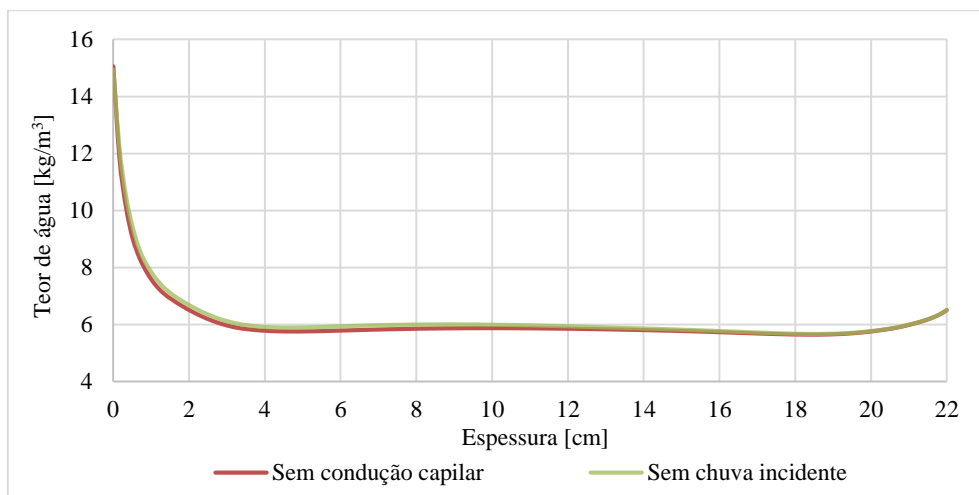


Fig. E.11 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do elemento construtivo para 01/01/2018 em relação à simulação sem condução capilar e à simulação sem chuva incidente. Tom forte é indicativo de sobreposição





## Anexo E.2. Estudo sobre a influência da camada de reboco e a importância WDR

### Anexo E.2.1 Reboco de cal

Quadro E.3 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cal

Caso de estudo	Constituição	Espessura	$S_{d,Total}$	Relação entre $S_d$	A	Relação entre A
		[m]	[m]	[%]	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]	[%]
1	Tijolo maciço	0,220	2,200	-	0,1100	-
2	Reboco de cal	0,015	2,305	5%	0,0470	57%
	Tijolo maciço	0,220				
3	Tijolo maciço	0,220	2,305	5%	0,1100	0%
	Reboco de cal	0,015				
4	Reboco de cal	0,015	2,410	9%	0,0470	57%
	Tijolo maciço	0,220				
	Reboco de cal	0,015				

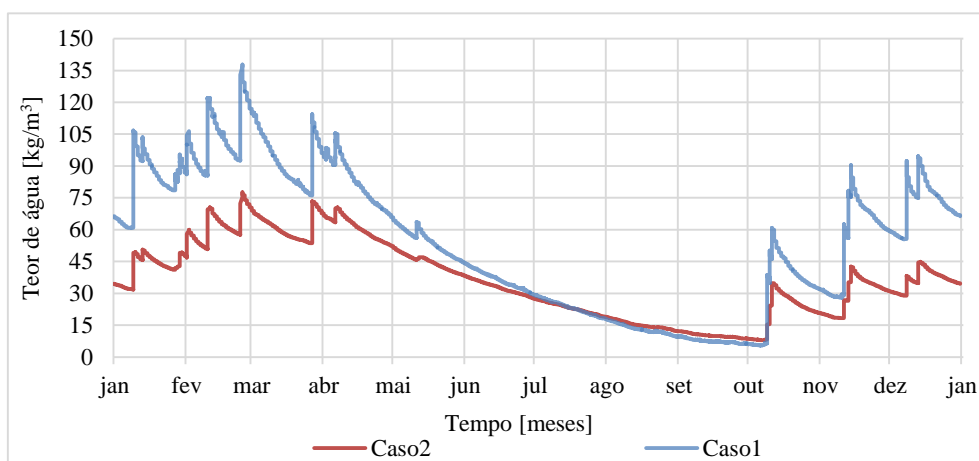


Fig. E.12 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o primeiro e o segundo casos de estudo com reboco de cal. Tons de azul forte são indicativos de sobreposição

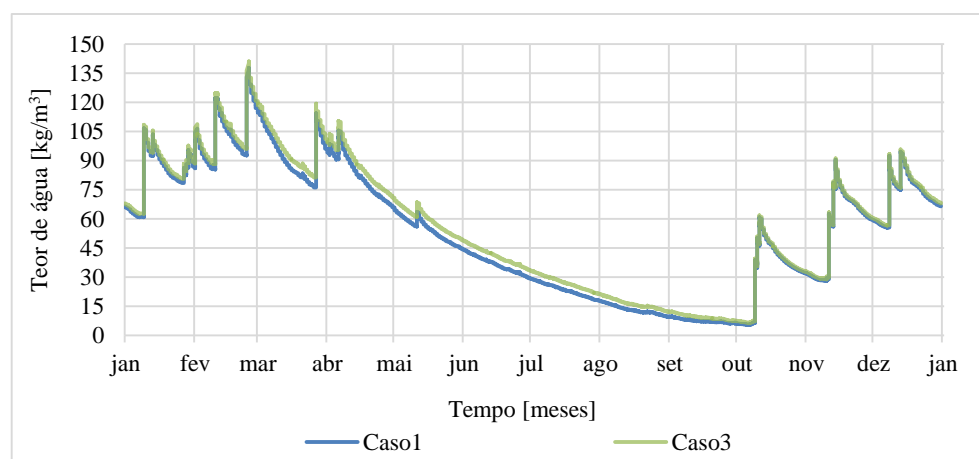


Fig. E.13 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o primeiro e o terceiro casos de estudo com reboco de cal. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

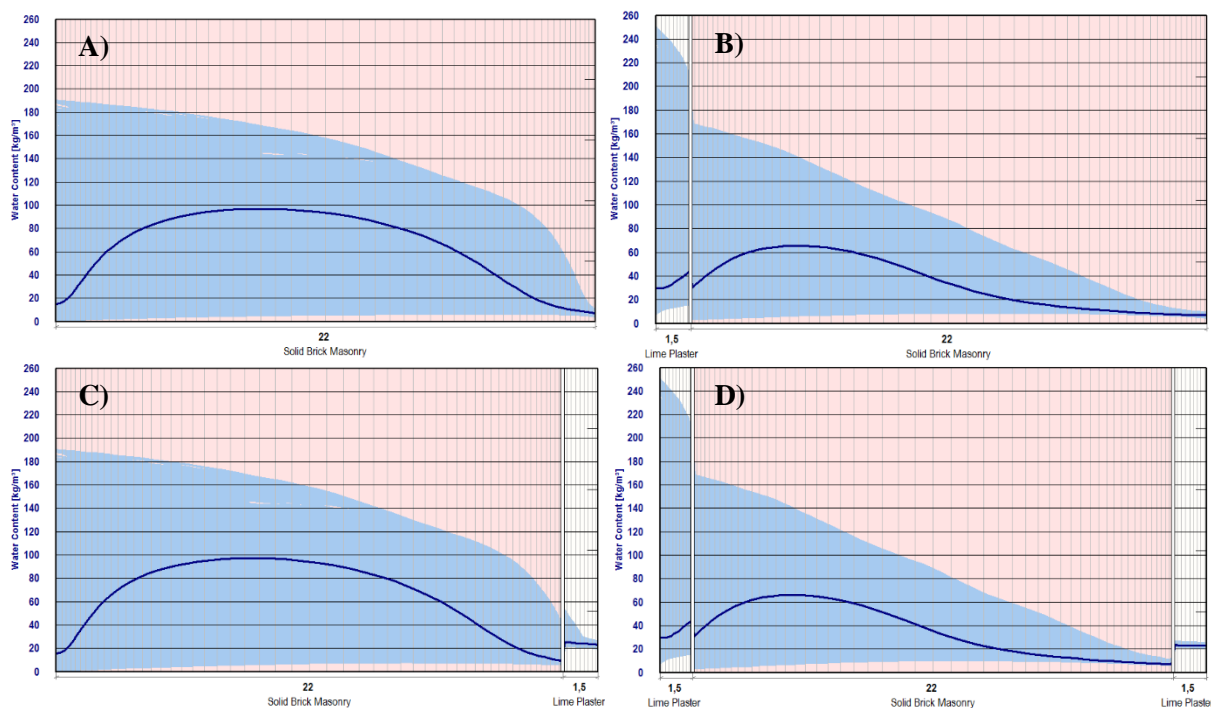


Fig. E.14 – Variação do teor de água para o primeiro (A), o segundo (B), o terceiro (C) e o quarto (D) casos de estudo com reboco de cal, retirado do WUFI®

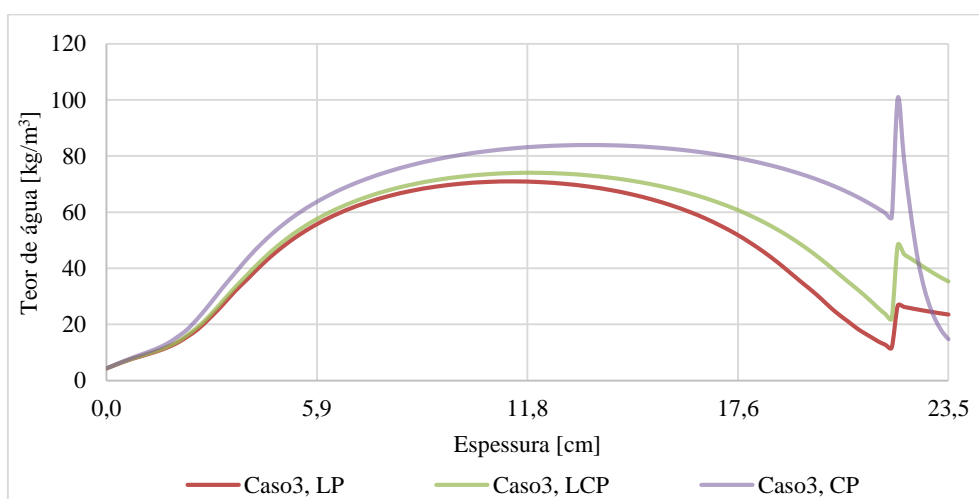


Fig. E.15 – Variação do teor de água ao longo da secção transversal do terceiro caso de estudo com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento no dia 1 de Junho de 2017. Tom forte é indicativo de sobreposição

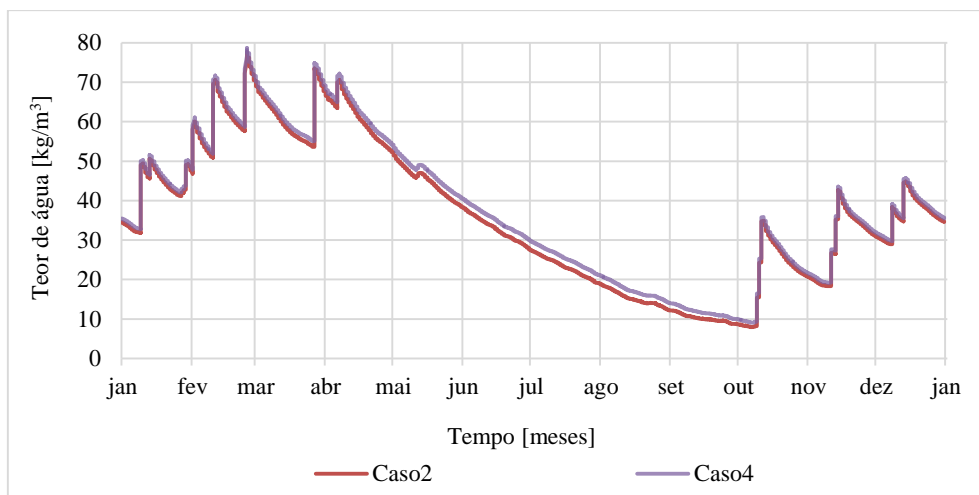


Fig. E.16 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço para o segundo e o quarto casos de estudo com reboco de cal. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

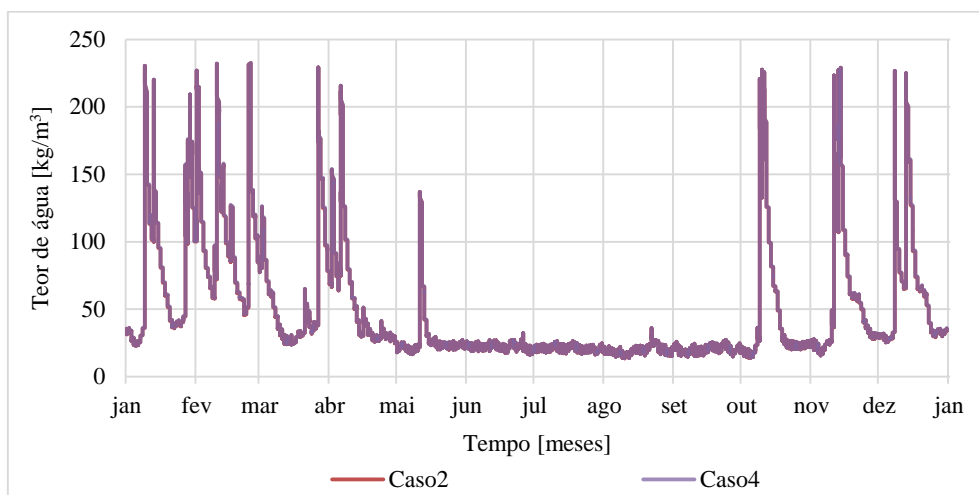


Fig. E.17 – Variação do teor de água para a camada de reboco exterior para o segundo e o quarto casos de estudo. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

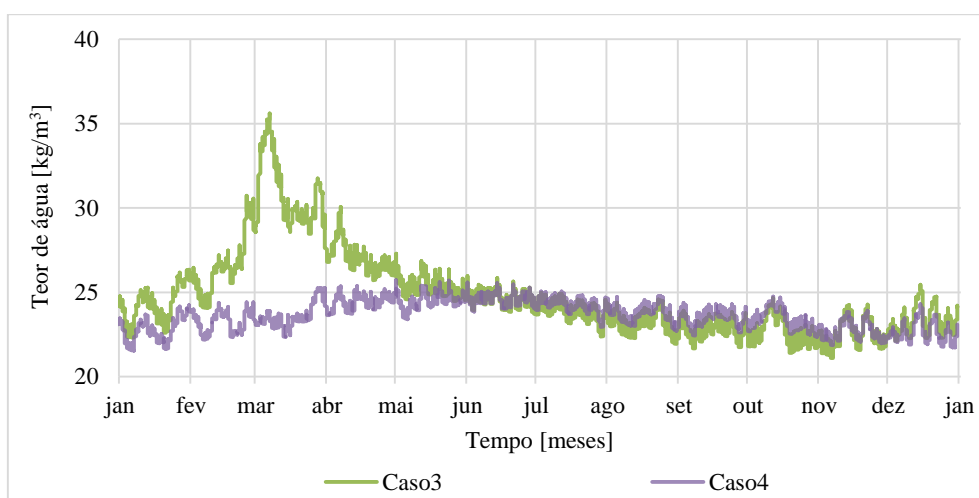


Fig. E.18 – Variação do teor de água para a camada de reboco interior para o terceiro e o quarto casos de estudo. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

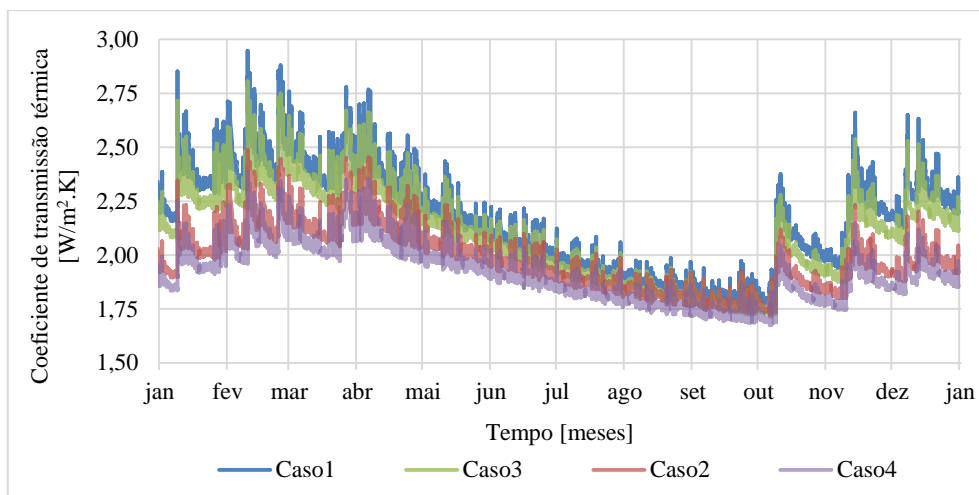


Fig. E.19 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

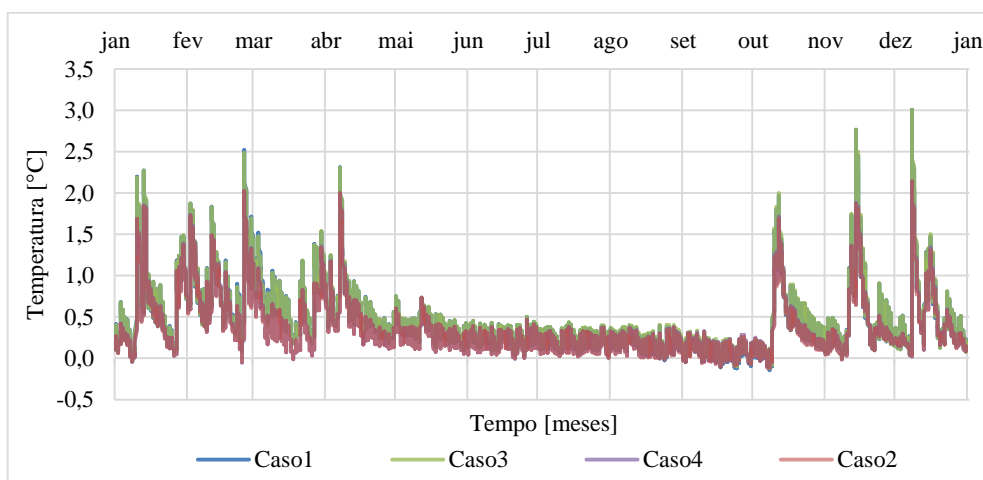
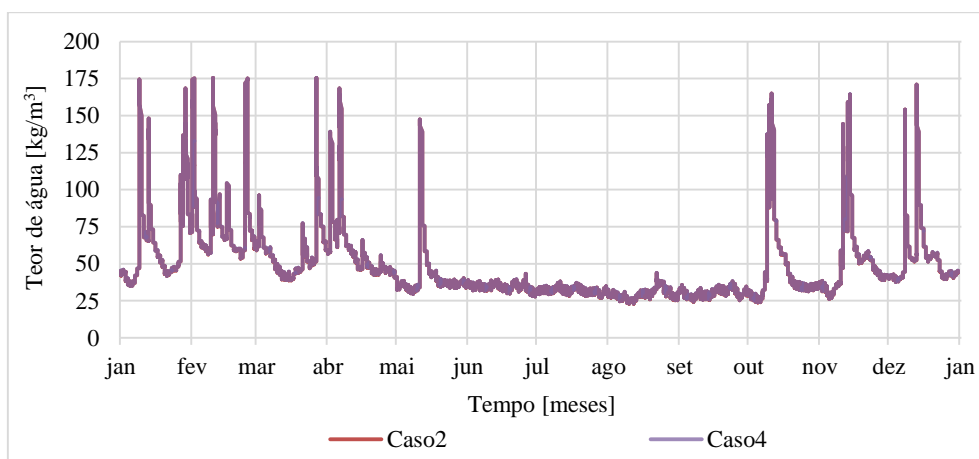
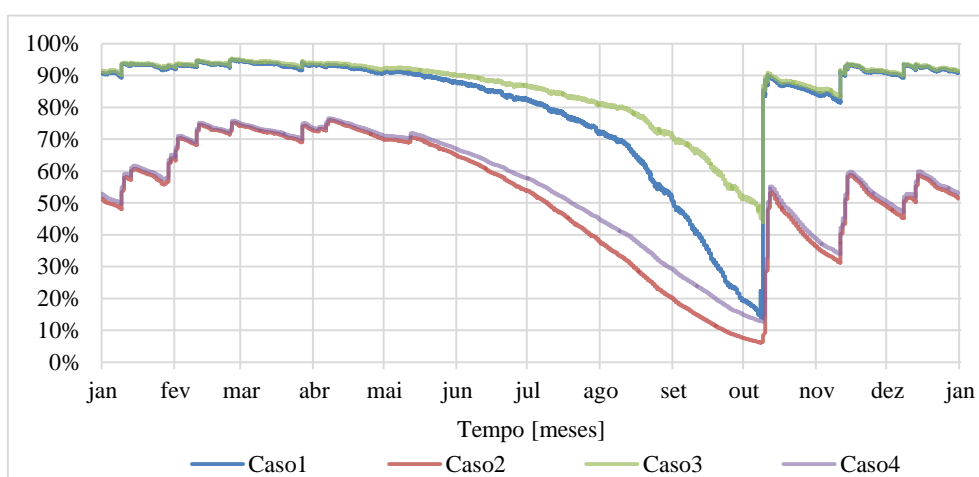


Fig. E.20 – Diferença de temperatura entre as simulações sem e com evaporação para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com rebocos de cal. Tom forte é indicativo de sobreposição

## Anexo E.2.2 Reboco de cal e cimento

Quadro E.4 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cal e cimento

Caso de estudo	Camada	Espessura	$S_{d,Total}$	Relação entre $S_d$	A	Relação entre A
		[m]	[m]	[%]	[kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]	[%]
1	Tijolo maciço	0,220	2,200	-	0,1100	-
2	Reboco de cal e cimento	0,015	2,485	11%	0,0170	85%
	Tijolo maciço	0,220				
3	Tijolo maciço	0,220	2,485	11%	0,1100	0%
	Reboco de cal e cimento	0,015				
4	Reboco de cal e cimento	0,015	2,770	21%	0,0170	85%
	Tijolo maciço	0,220				
	Reboco de cal e cimento	0,015				



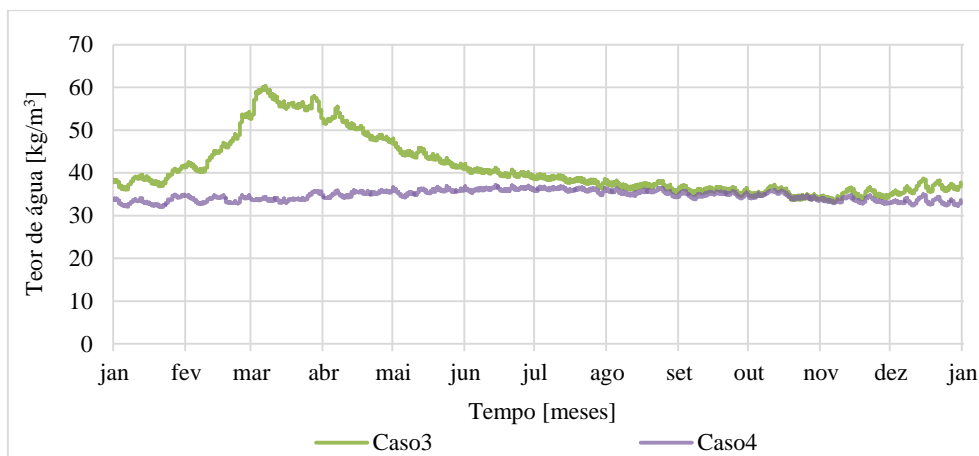


Fig. E.23 – Variação do teor de água da camada de reboco de cal e cimento interior para o terceiro e o quarto casos de estudo. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

### Anexo E.2.3 Reboco de cimento

Quadro E.5 – Especificações relevantes das simulações efectuadas com a camada de reboco de cimento

Caso de estudo	Camada	Espessura	$S_{d,Total}$	Relação entre $S_d$	A	Relação entre A
		[m]	[m]	[%]	[kg/m².s <sup>0,5</sup> ]	[%]
1	Tijolo maciço	0,220	2,200	-	0,1100	-
2	Reboco de cimento	0,015	2,575	15%	0,0076	93%
	Tijolo maciço	0,220				
3	Tijolo maciço	0,220	2,575	15%	0,1100	0%
	Reboco de cimento	0,015				
4	Reboco de cimento	0,015	2,950	25%	0,0076	93%
	Tijolo maciço	0,220				
	Reboco de cimento	0,015				

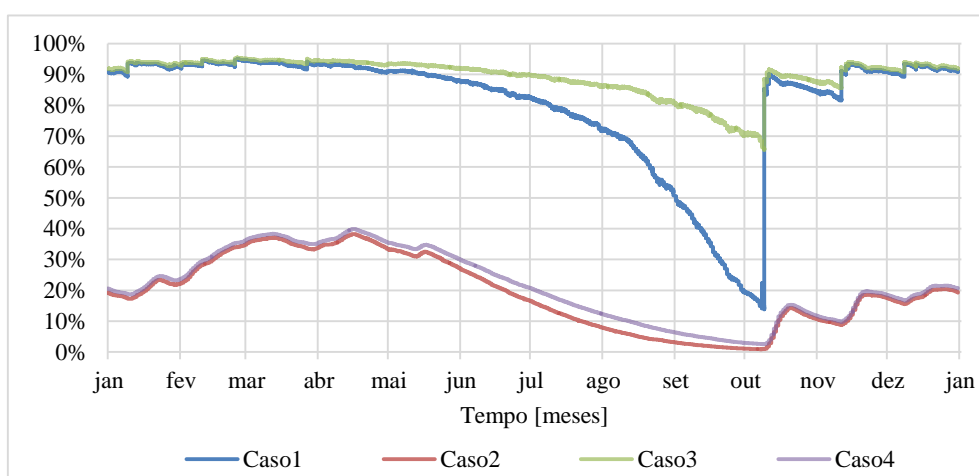


Fig. E.24 – Importância da chuva incidente em relação à camada de tijolo maciço para o caso de estudo padrão e os três casos de estudo com reboco de cimento. Tom forte é indicativo de sobreposição

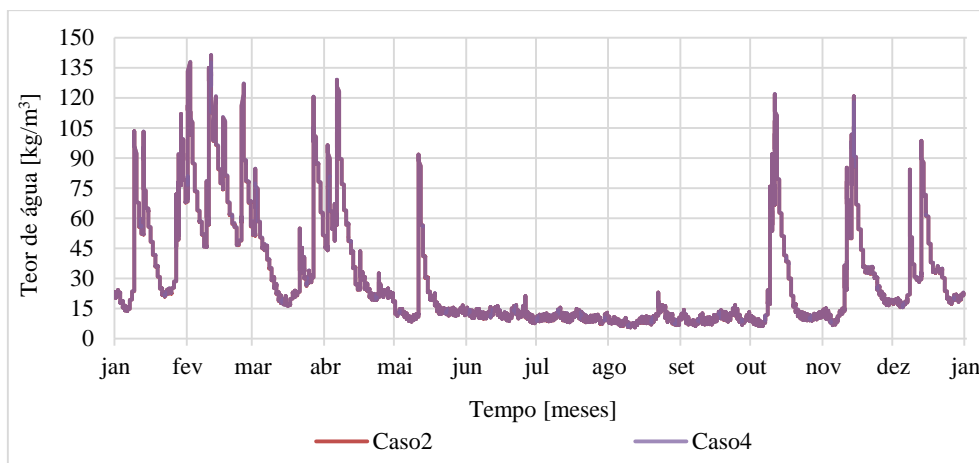


Fig. E.25 – Variação do teor de água da camada de reboco de cimento exterior para o segundo e o quarto casos de estudo. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

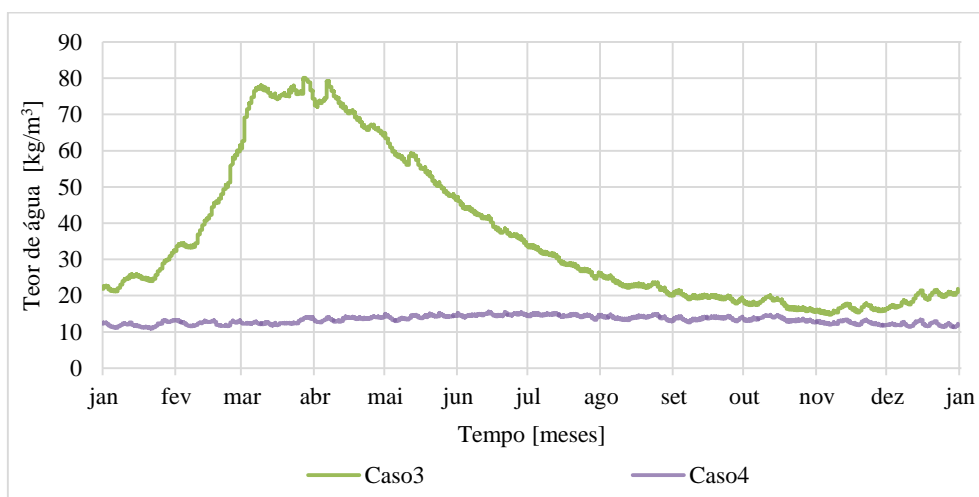


Fig. E.26 – Variação do teor de água da camada de reboco de cimento interior para o terceiro e o quarto casos de estudo. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição





### Anexo E.3. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo interior

#### Reboco de cal:

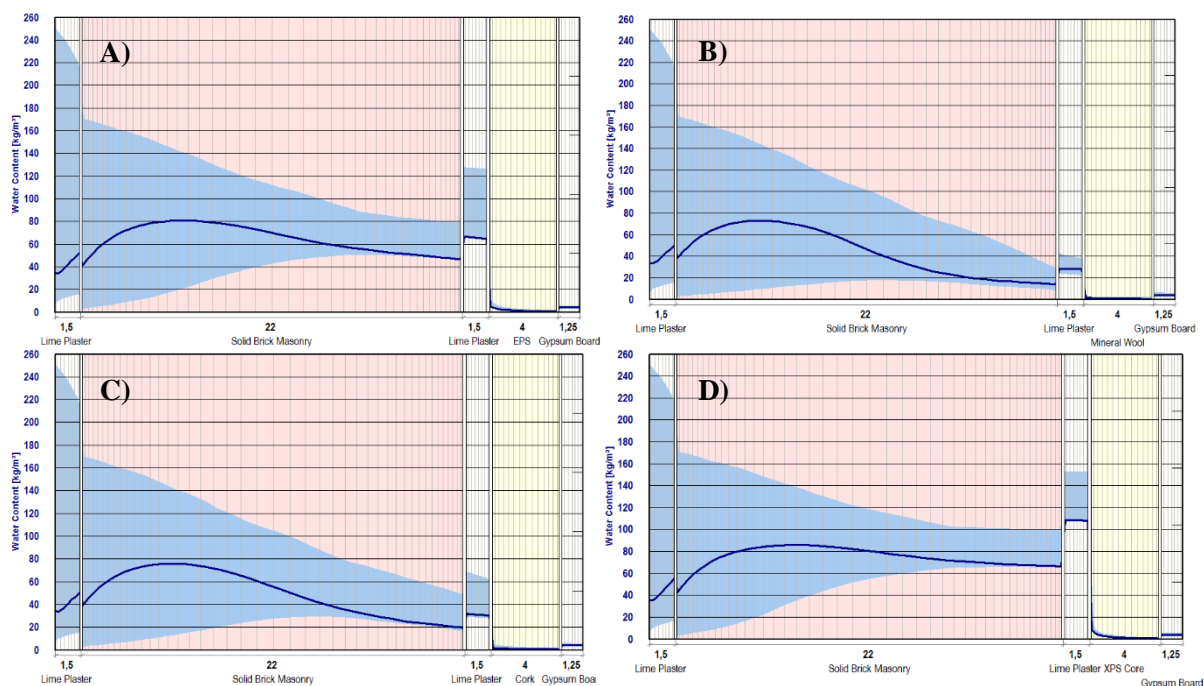


Fig. E.27 – Variação do teor de água ao longo do elemento construtivo para o segundo (A), o terceiro (B), o quarto (C) e o quinto (D) casos de estudo com reboco de cal, figura retirado do programa WUFI®

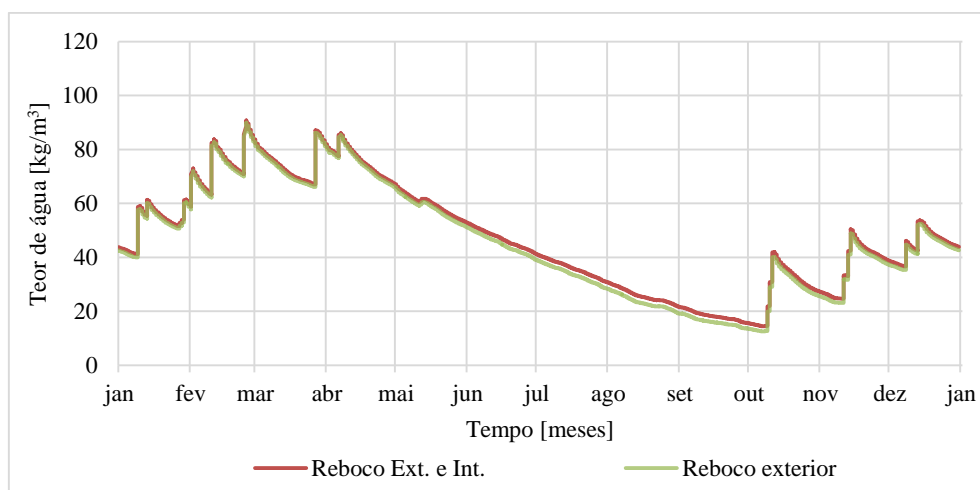


Fig. E.28 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

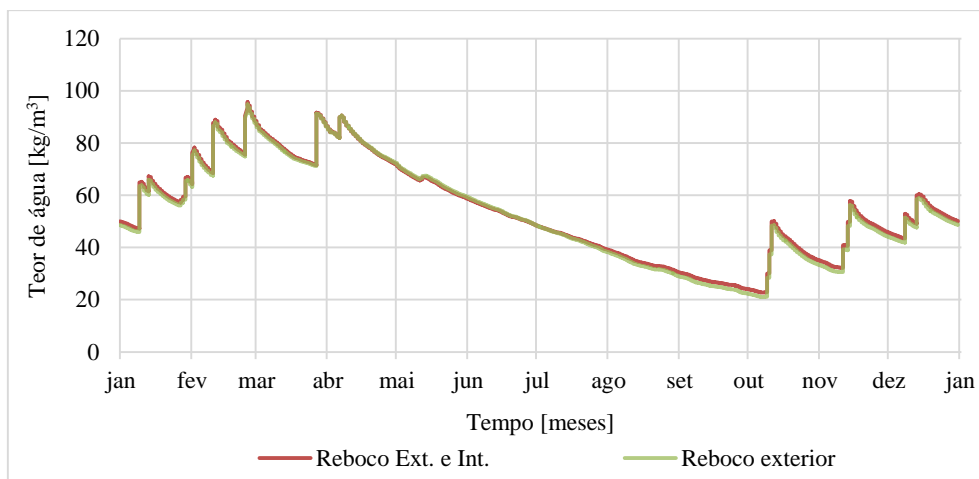


Fig. E.29 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

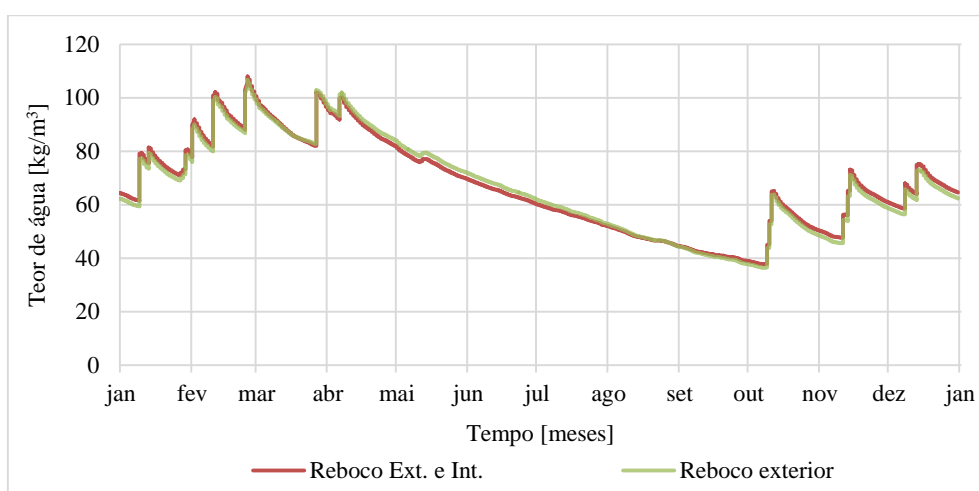


Fig. E.30 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

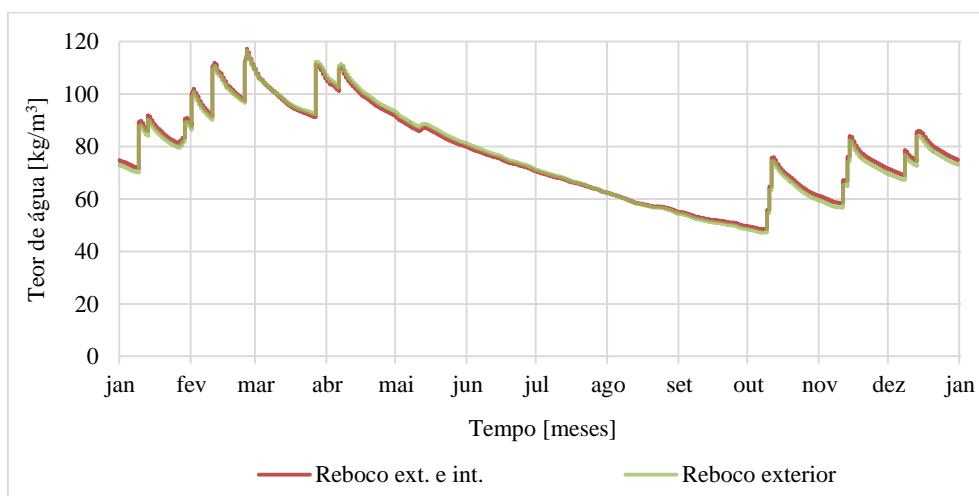


Fig. E.31 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

### Reboco de cal e cimento:

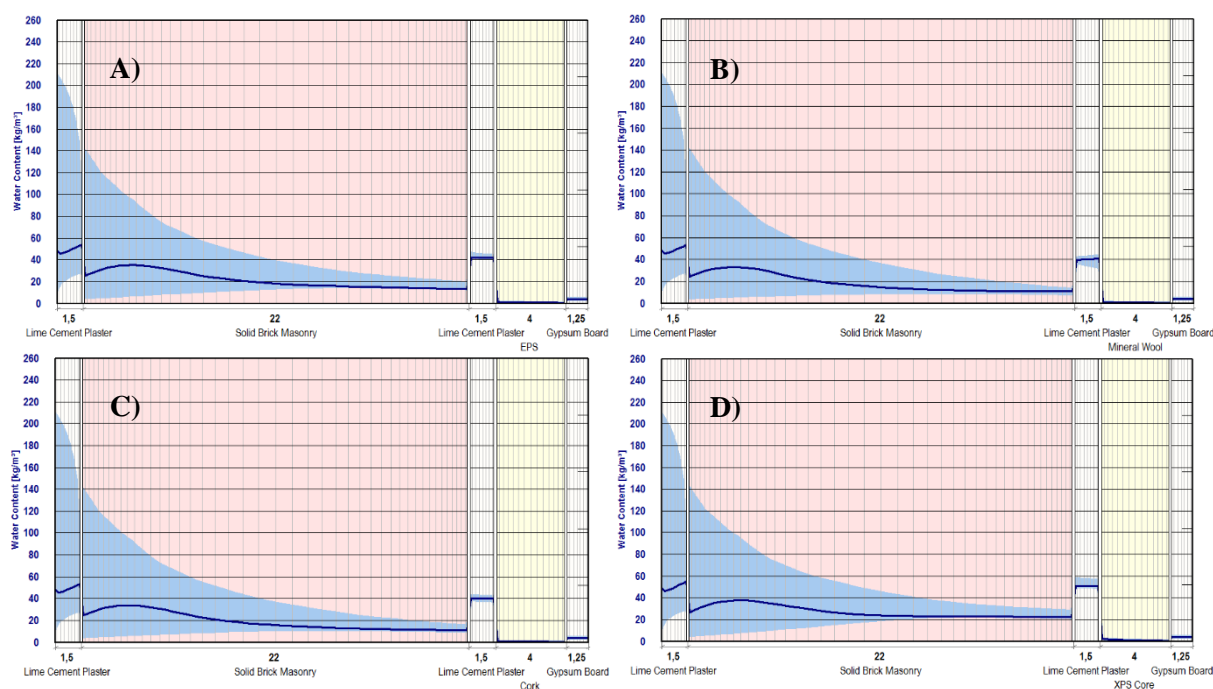


Fig. E.32 – Variação do teor de água ao longo do elemento construtivo para o segundo (A), o terceiro (B), o quarto (C) e o quinto (D) casos de estudo com reboco de cal e cimento, figura retirado do programa WUFI®

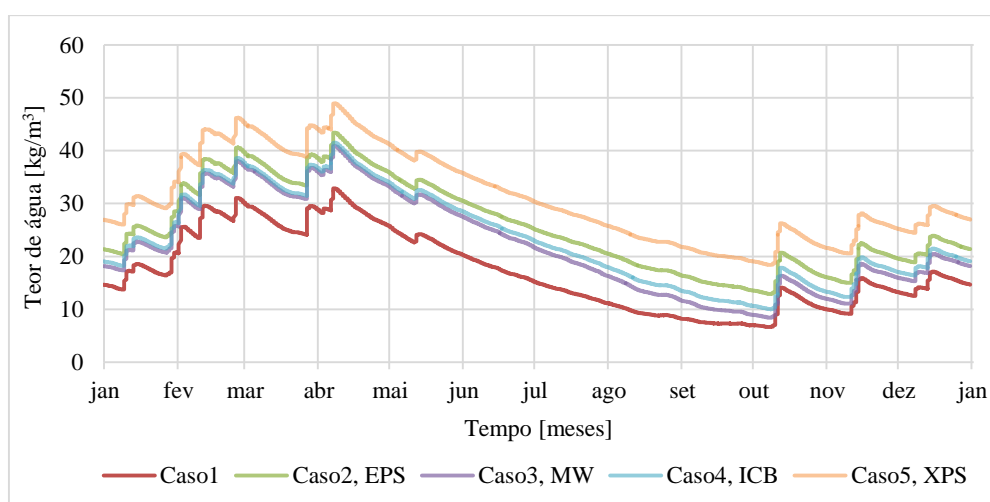


Fig. E.33 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

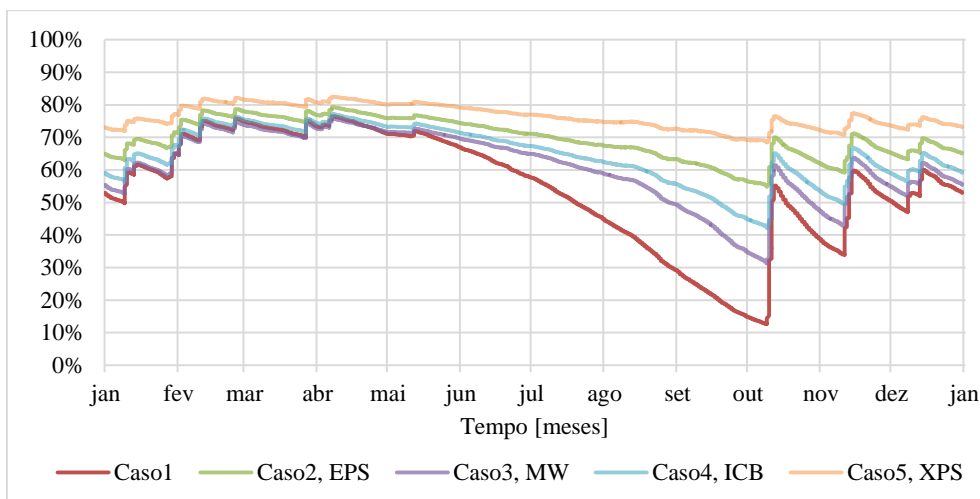


Fig. E.34 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço dos cinco casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

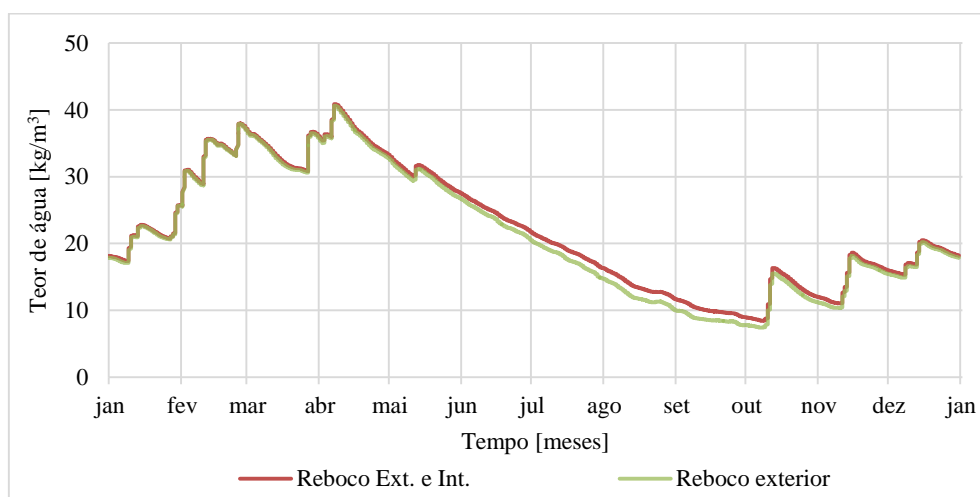


Fig. E.35 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

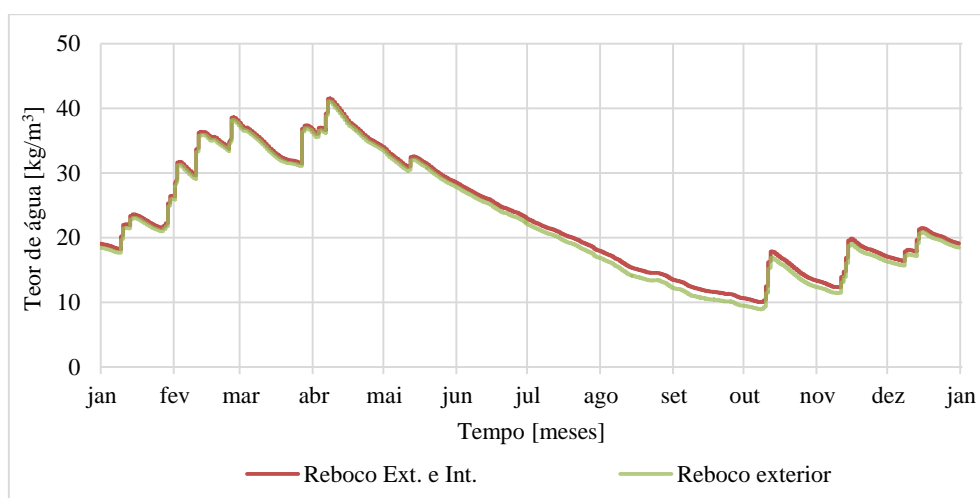


Fig. E.36 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

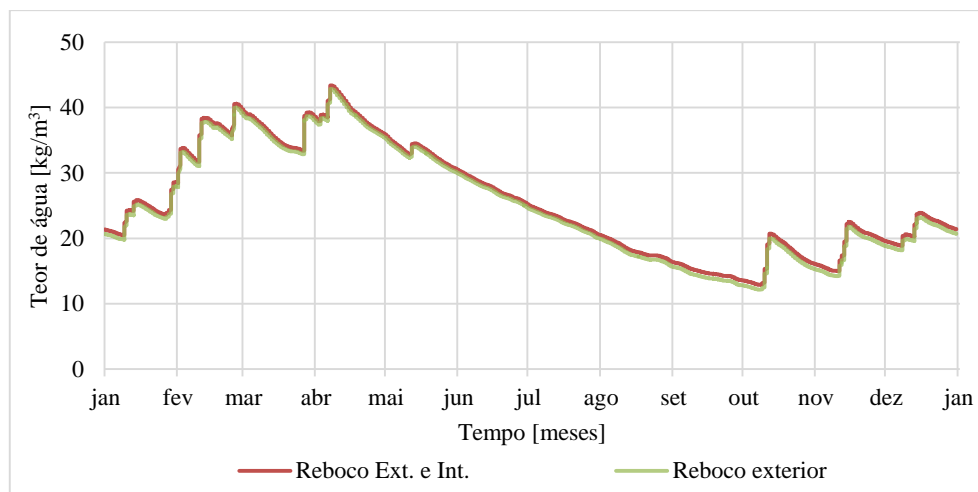


Fig. E.37 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

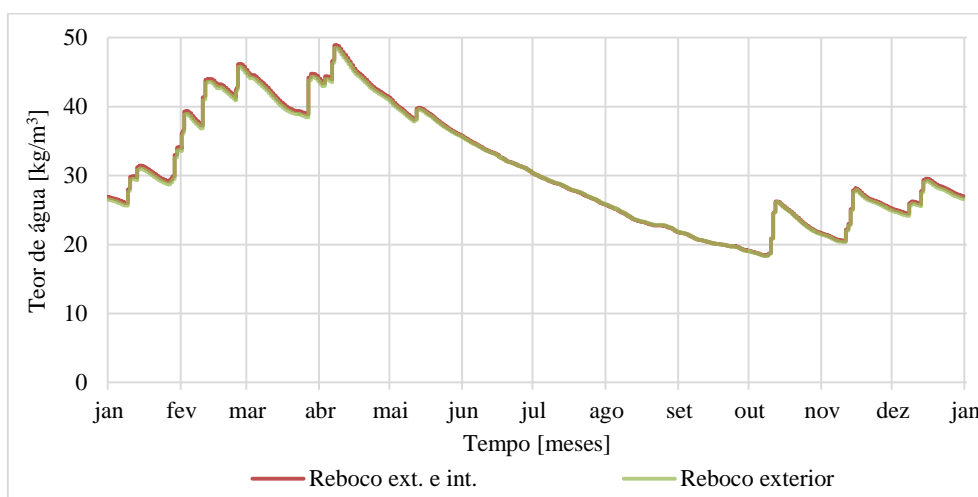
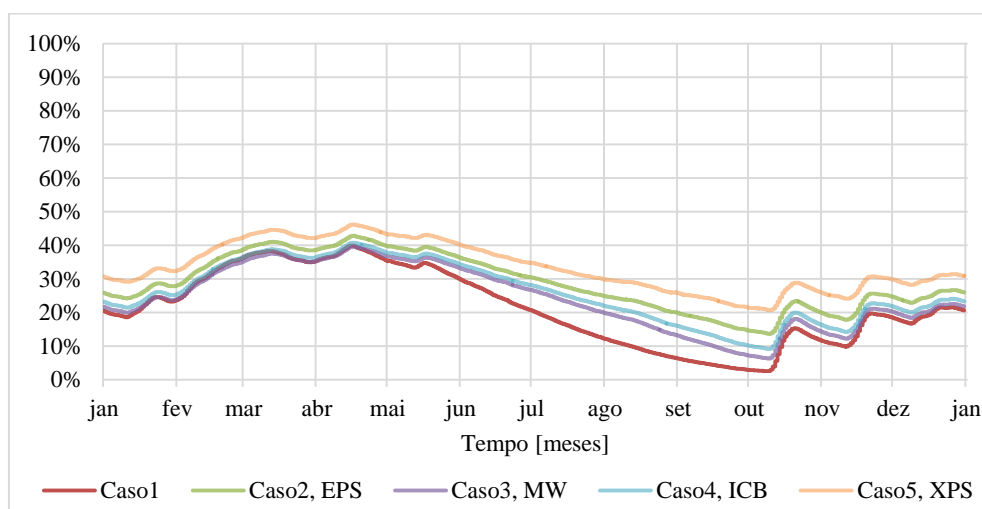
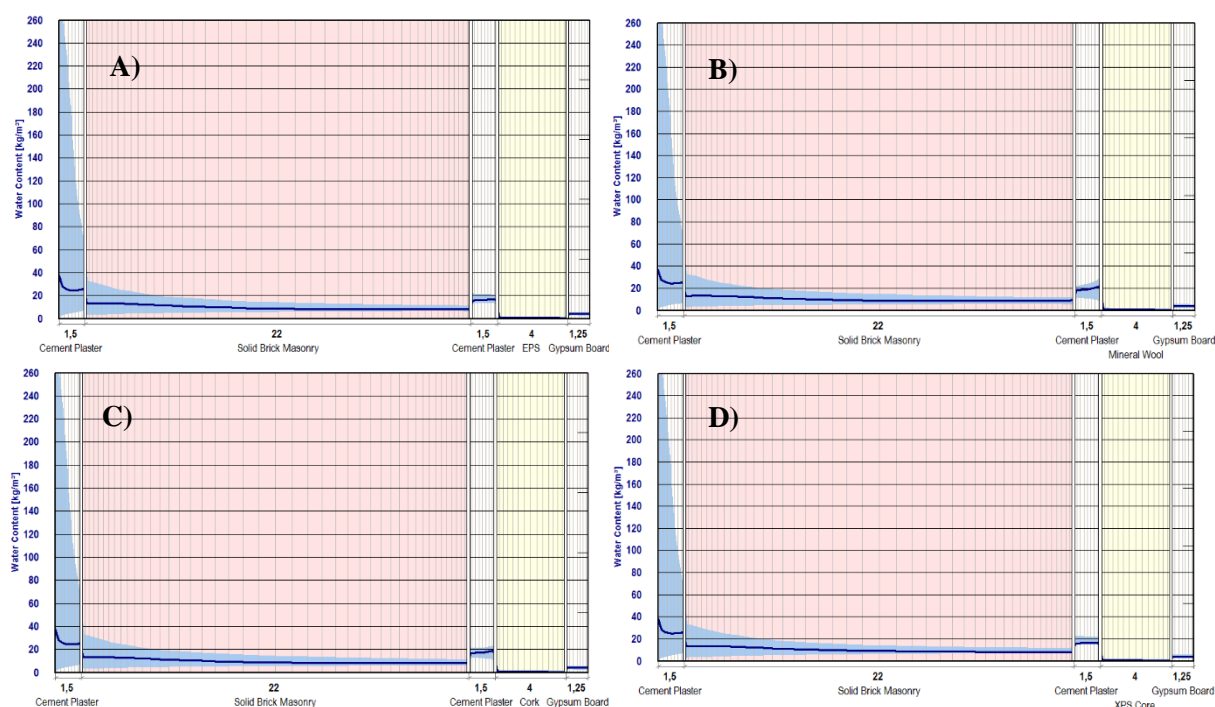


Fig. E.38 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

### Reboco de cimento:



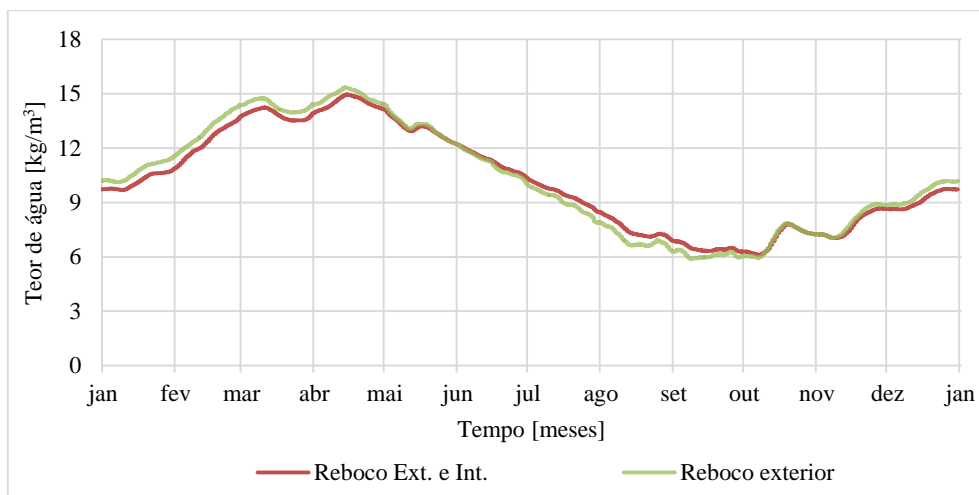


Fig. E.41 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (MW) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

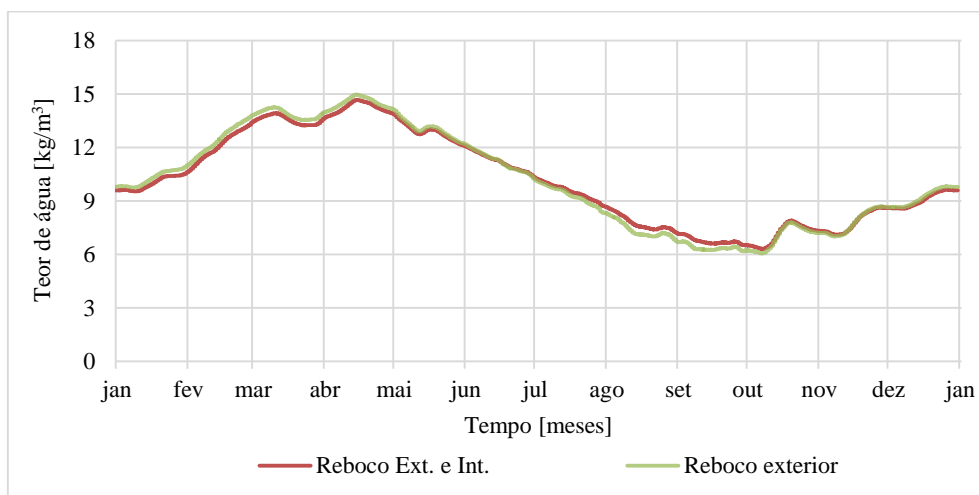


Fig. E.42 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quarto caso de estudo (ICB) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

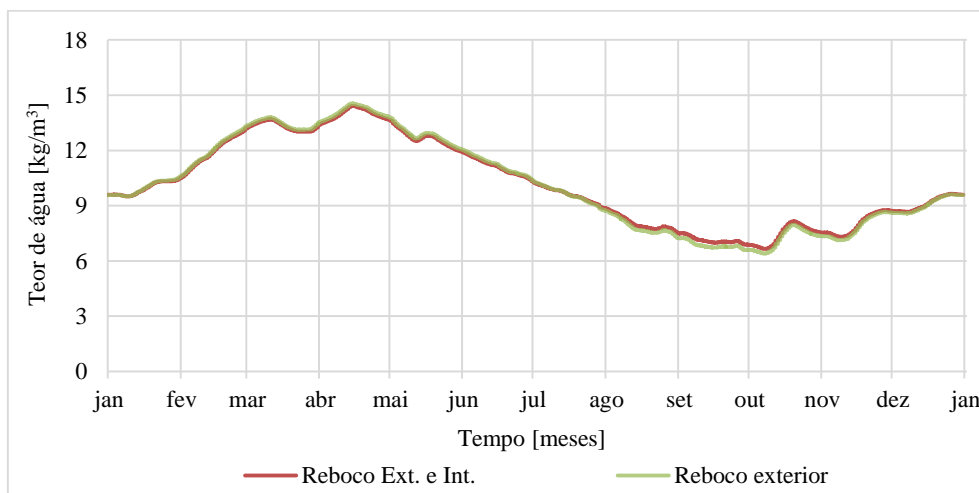


Fig. E.43 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

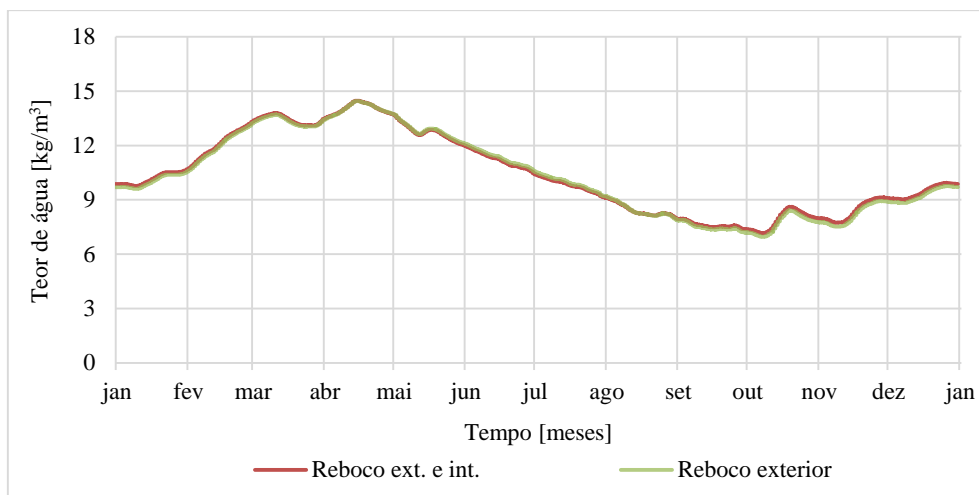


Fig. E.44 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço do quinto caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces e apenas na face exterior. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição

#### Análise aos três tipos de reboco:

Quadro E.6 – Espessura e espessura da camada de ar de difusão equivalente e respectivo aumento em relação ao caso de estudo padrão para os casos de estudo com reboco de cal, de cal e cimento, e de cimento

Caso de estudo	Espessura	S <sub>d,total</sub>			Aumento em relação ao caso de estudo padrão		
		[m]					
	[m]	LP	LCP	CP	LP	LCP	CP
Caso estudo padrão	0,220	2,200			-		
1	0,250	2,410	2,770	2,950	9,5%	25,9%	34,1%
2 - EPS	0,303	3,714	4,074	4,254	68,8%	85,2%	93,4%
3 - MW	0,303	2,566	2,926	3,106	16,6%	33,0%	41,2%
4 - ICB	0,303	2,914	3,274	3,454	32,4%	48,8%	57,0%
5 - XPS	0,303	6,514	6,874	7,054	196,1%	212,4%	220,6%

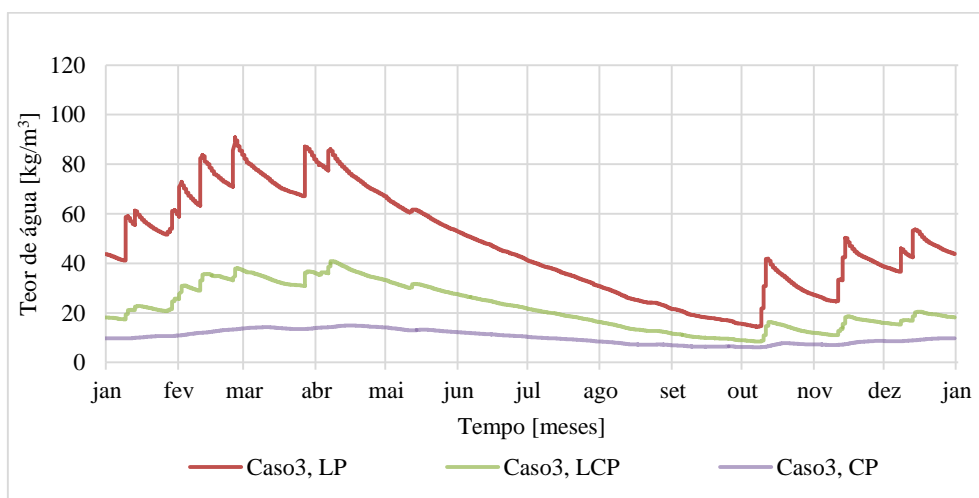


Fig. E.45 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de lã mineral em função do tipo de reboco. Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição



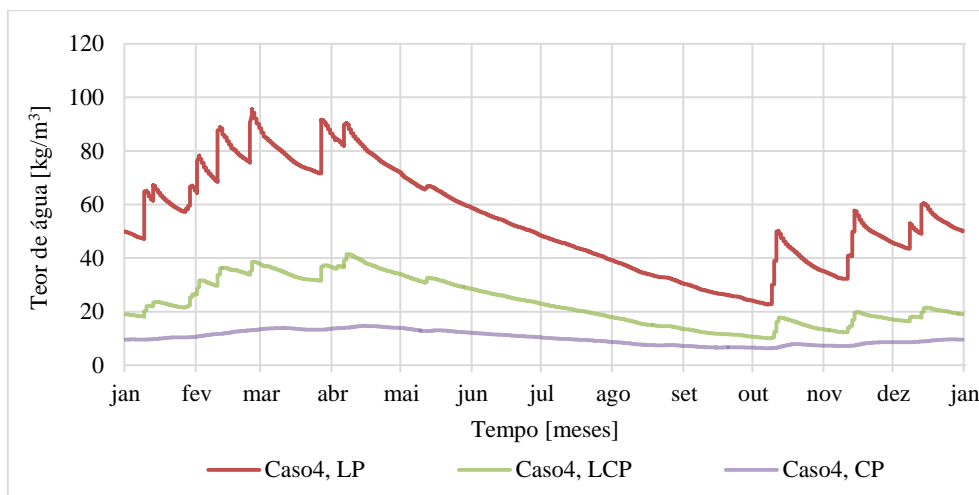


Fig. E.46 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de aglomerado de cortiça expandido em função do tipo de reboco. Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

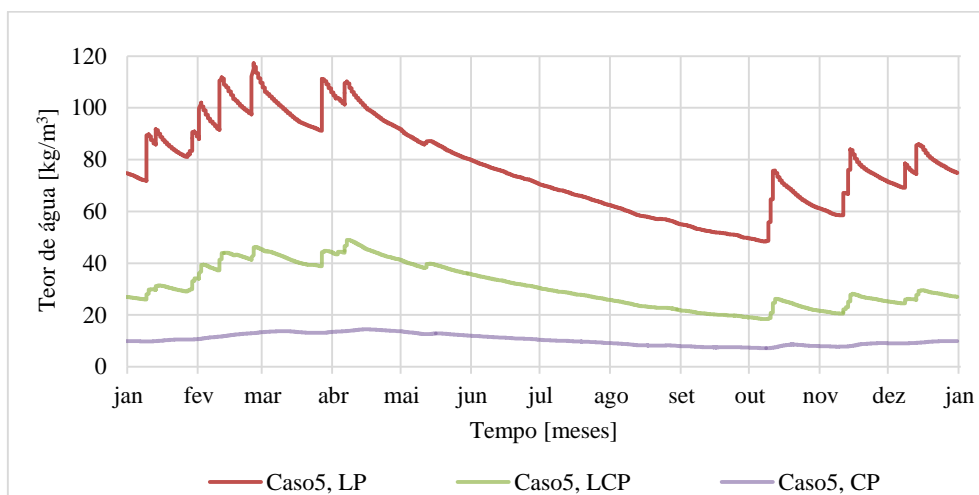


Fig. E.47 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço com isolamento térmico de poliestireno extrudado em função do tipo de reboco. Tons de verde ou roxo forte são indicativos de sobreposição

### Análise à Temperatura:

Quadro E.7 – Cálculo da resistência térmica do elemento construtivo do segundo, terceiro e quarto casos de estudo. Valores da condutibilidade térmica dos materiais em estado seco consultados na biblioteca do WUFI®

Material	Espessura	$\lambda_0$	R	Percentagem
	[m]	[W/m.K]	[m <sup>2</sup> .K/W]	
Reboco de cal	0,015	0,700	0,021	1,5%
Tijolo maciço	0,220	0,600	0,367	24,9%
Reboco de cal	0,015	0,700	0,021	1,5%
Isolamento térmico	0,040	0,040	1,000	67,9%
Gesso cartonado	0,0125	0,200	0,063	4,2%
Total	0,3025	$R_T$ [m <sup>2</sup> .K/W]	1,472	100%

Quadro E.8 – Cálculo da resistência térmica do elemento construtivo do quinto caso de estudo. Valores da condutibilidade térmica dos materiais em estado seco consultados na biblioteca do WUFI®

Material	Espessura	$\lambda_0$	R	Percentagem
	[m]	[W/m.K]	[m <sup>2</sup> .K/W]	
Reboco de cal	0,015	0,700	0,021	1,2%
Tijolo maciço	0,220	0,600	0,367	20,3%
Reboco de cal	0,015	0,700	0,021	1,2%
Isolamento térmico	0,040	0,030	1,333	73,9%
Gesso cartonado	0,0125	0,200	0,063	3,5%
Total	0,3025	$R_T$ [m <sup>2</sup> .K/W]	1,805	100%

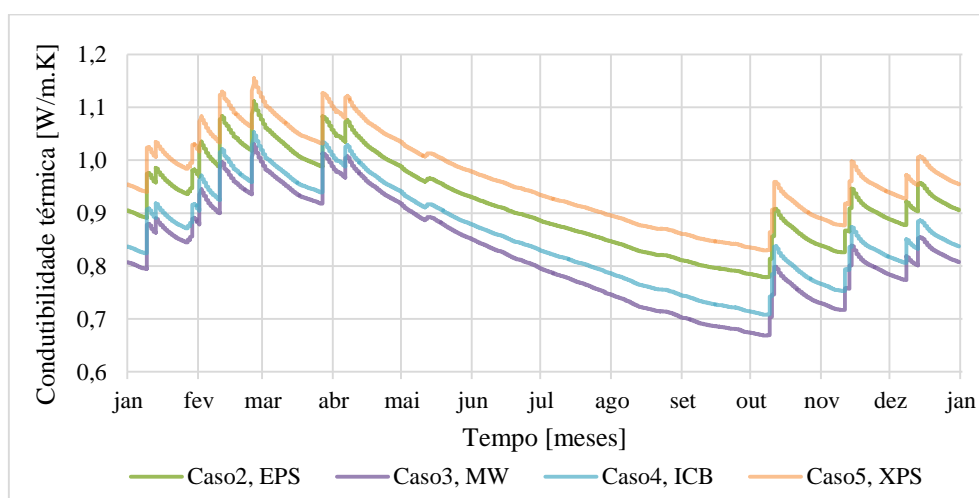


Fig. E.48 – Variação da condutibilidade térmica da camada de tijolo maciço para os quatro casos de estudo de reabilitação térmica com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

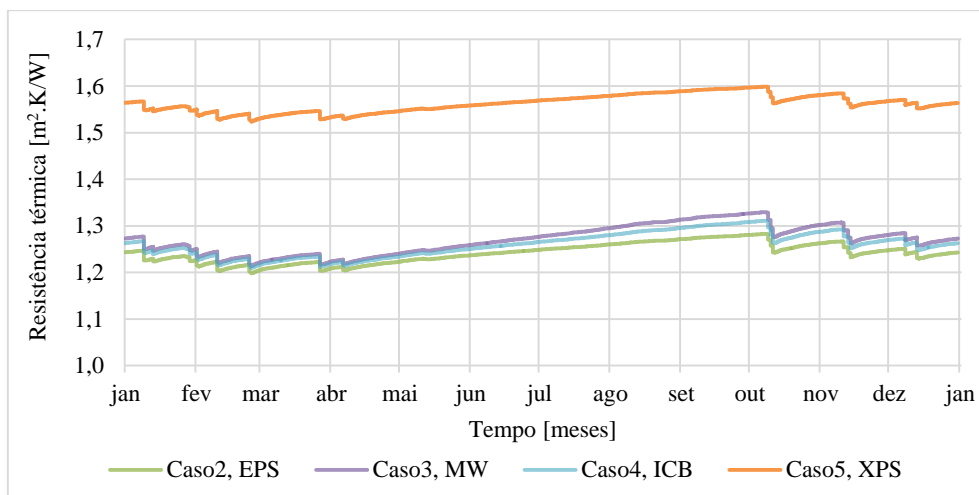


Fig. E.49 – Variação da resistência térmica apenas para as camadas de tijolo maciço e de isolamento térmico dos quatro casos de estudo de reabilitação térmica pelo interior com reboco de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

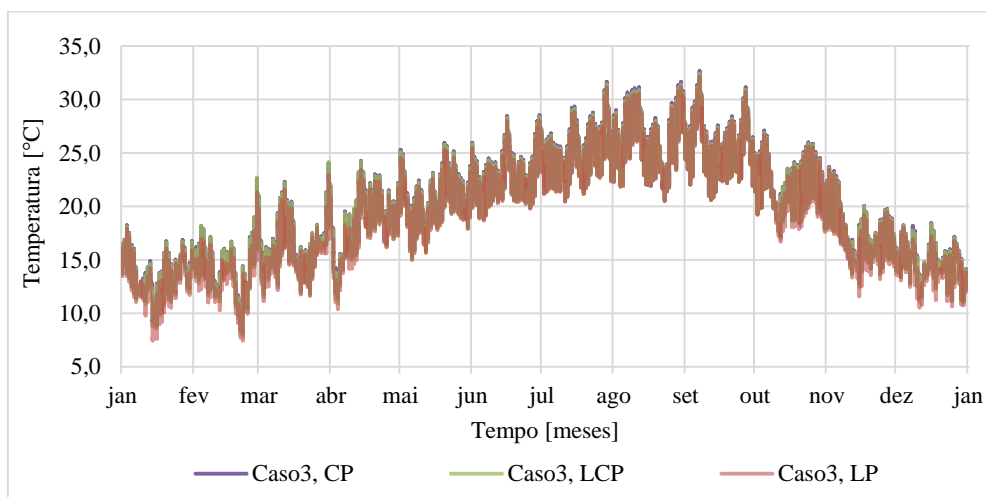


Fig. E.50 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o terceiro caso de estudo (MW) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

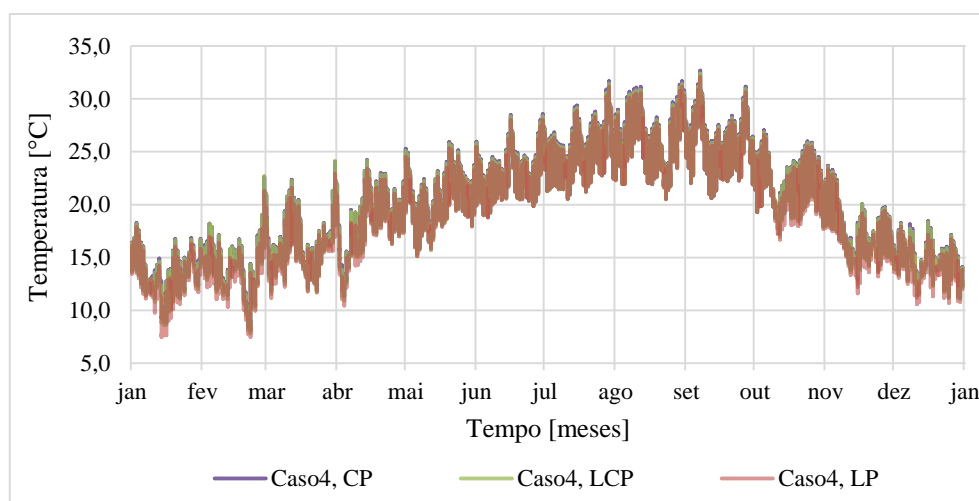


Fig. E.51 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o quarto caso de estudo (ICB) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

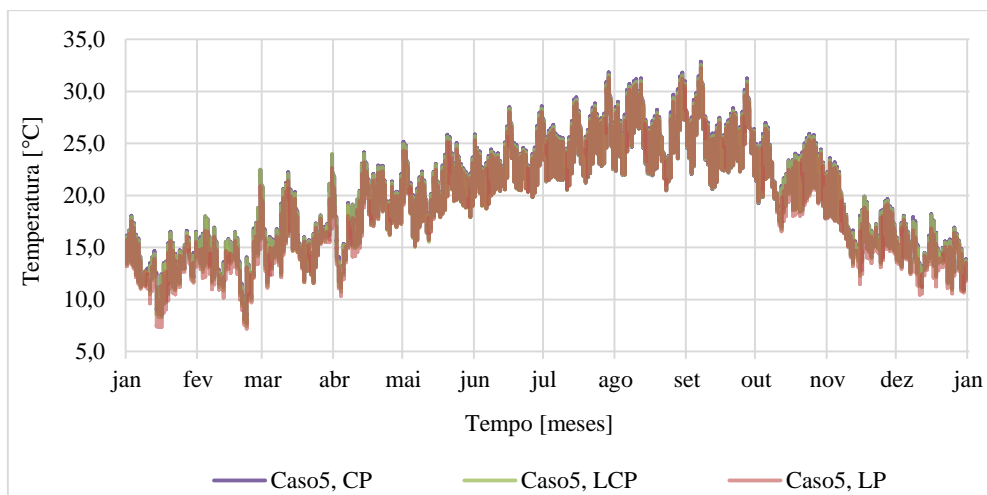


Fig. E.52 – Variação da temperatura a meio da camada de tijolo maciço para o quinto caso de estudo (XPS) com reboco de cimento, de cal e cimento, e de cal em ambas as faces. Tom forte é indicativo de sobreposição

#### Anexo E.4. Estudo sobre solução de reabilitação térmica pelo exterior

##### Reboco de cal:

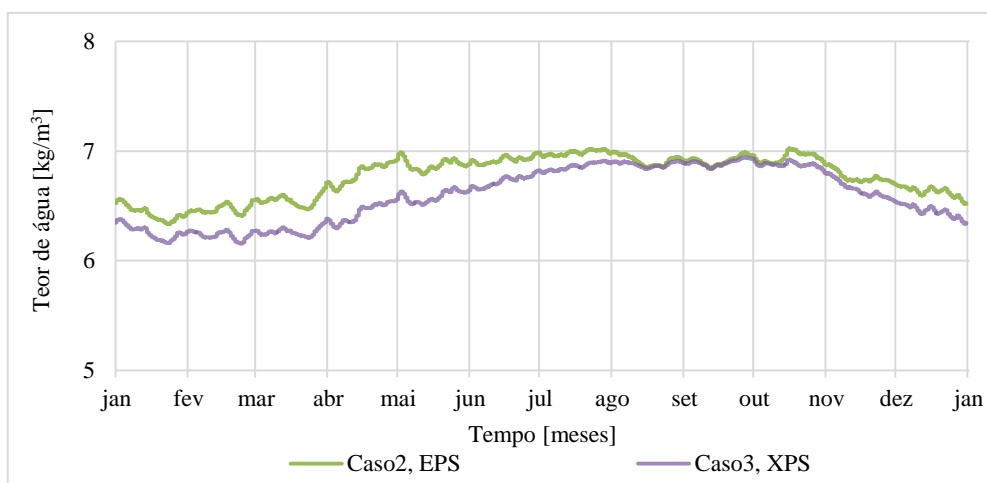


Fig. E.53 – Variação do teor de água para a camada de tijolo maciço para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

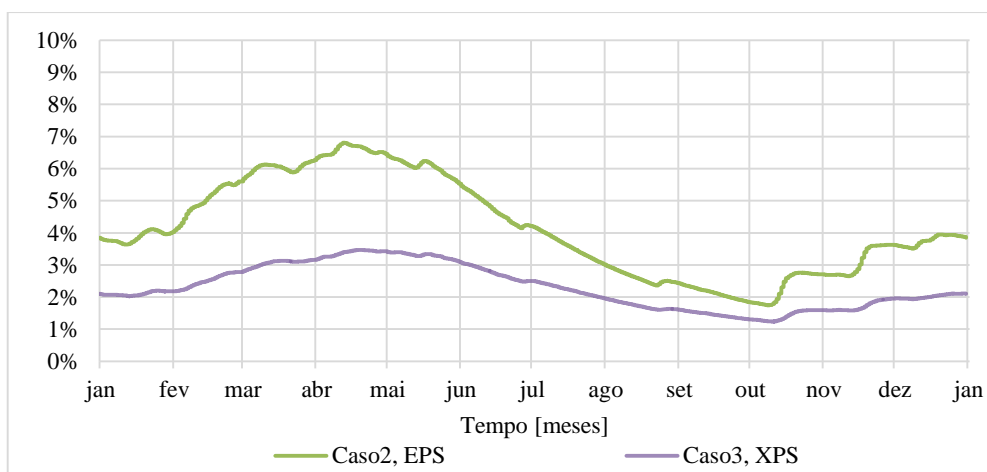


Fig. E.54 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

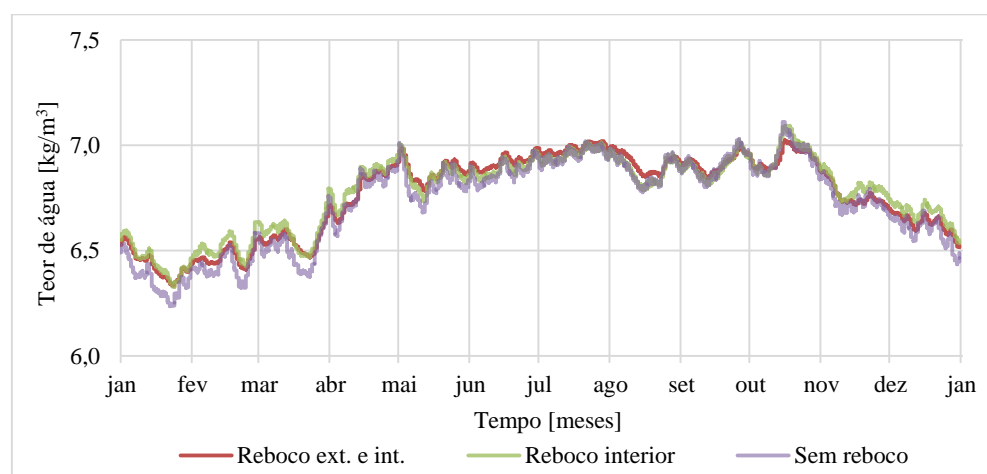


Fig. E.55 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

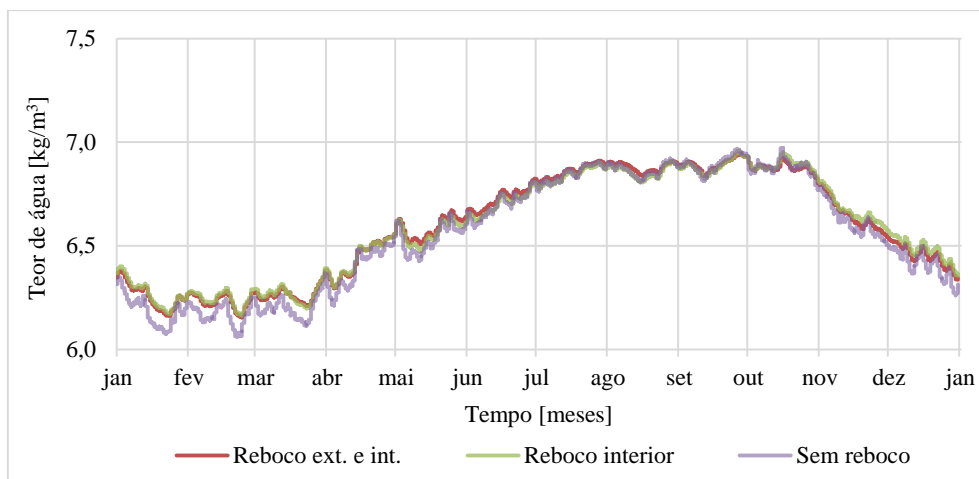


Fig. E.56 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

#### Reboco de cal e cimento:

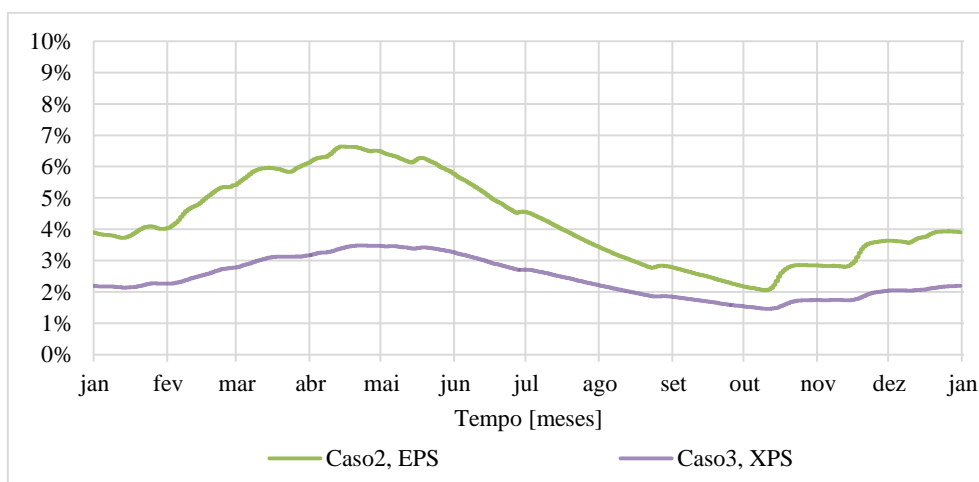


Fig. E.57 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do segundo e do terceiro casos de estudo com reboco de cal e cimento em ambas as faces. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

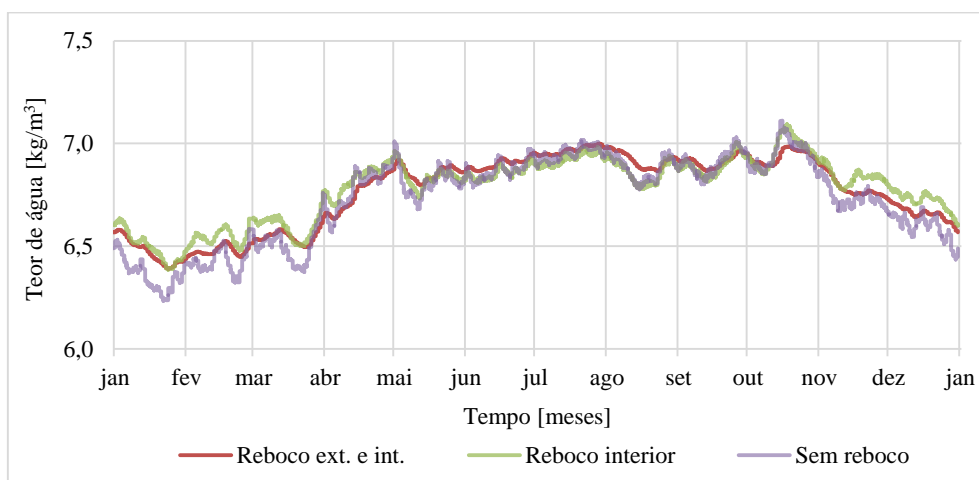


Fig. E.58 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

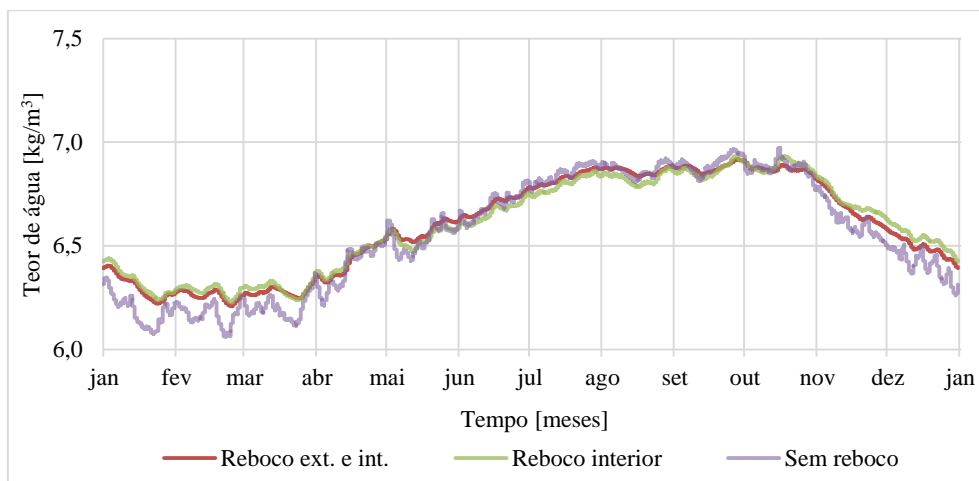


Fig. E.59 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cal e cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

#### Reboco de cimento:

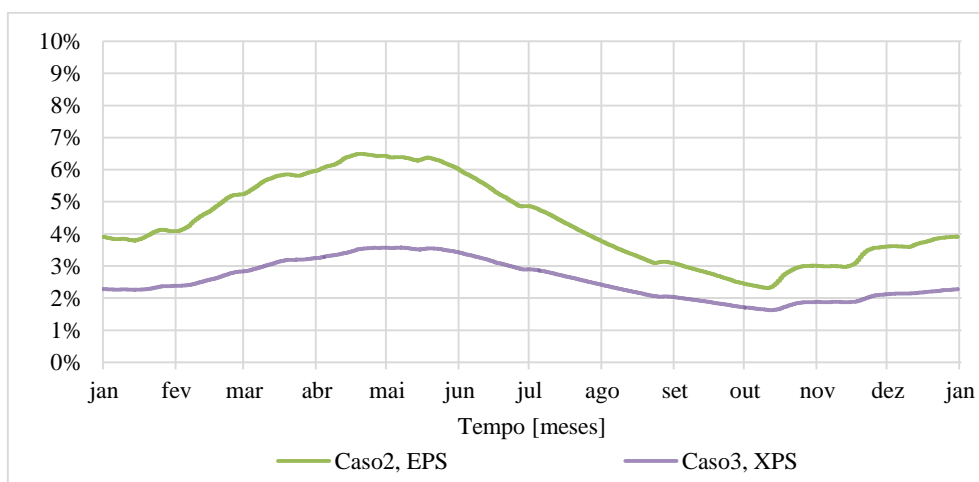


Fig. E.60 – Importância da chuva incidente para a camada de tijolo maciço do segundo e do terceiro casos de estudo com reboco de cimento em ambas as faces. Tons de roxo forte são indicativos de sobreposição

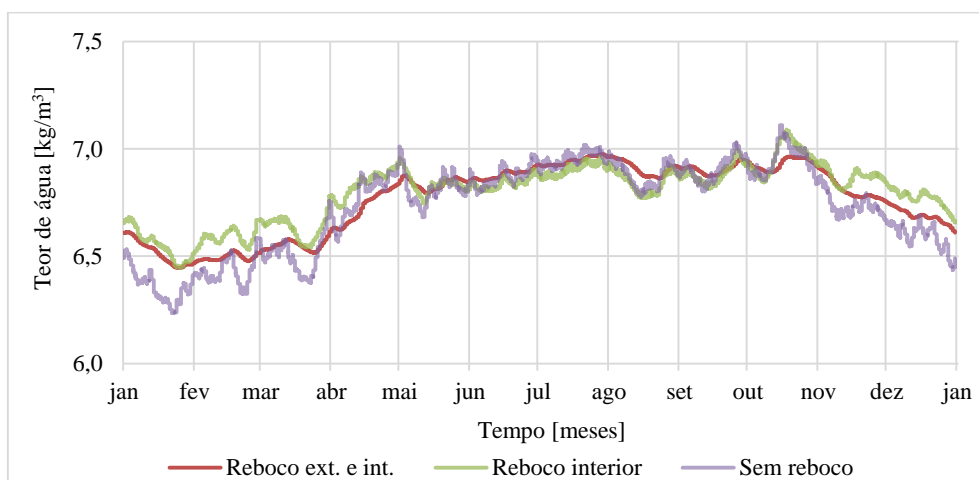


Fig. E.61 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do segundo caso de estudo (EPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

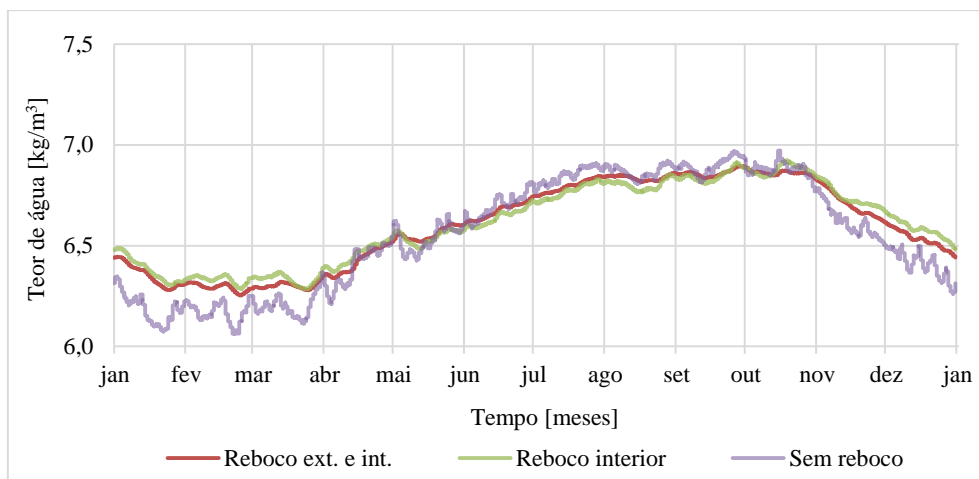


Fig. E.62 – Variação do teor de água da camada de tijolo maciço do terceiro caso de estudo (XPS) para as simulações com reboco de cimento em ambas as faces, apenas na face interior e em nenhuma face. Tom forte é indicativo de sobreposição

### Análise à temperatura:

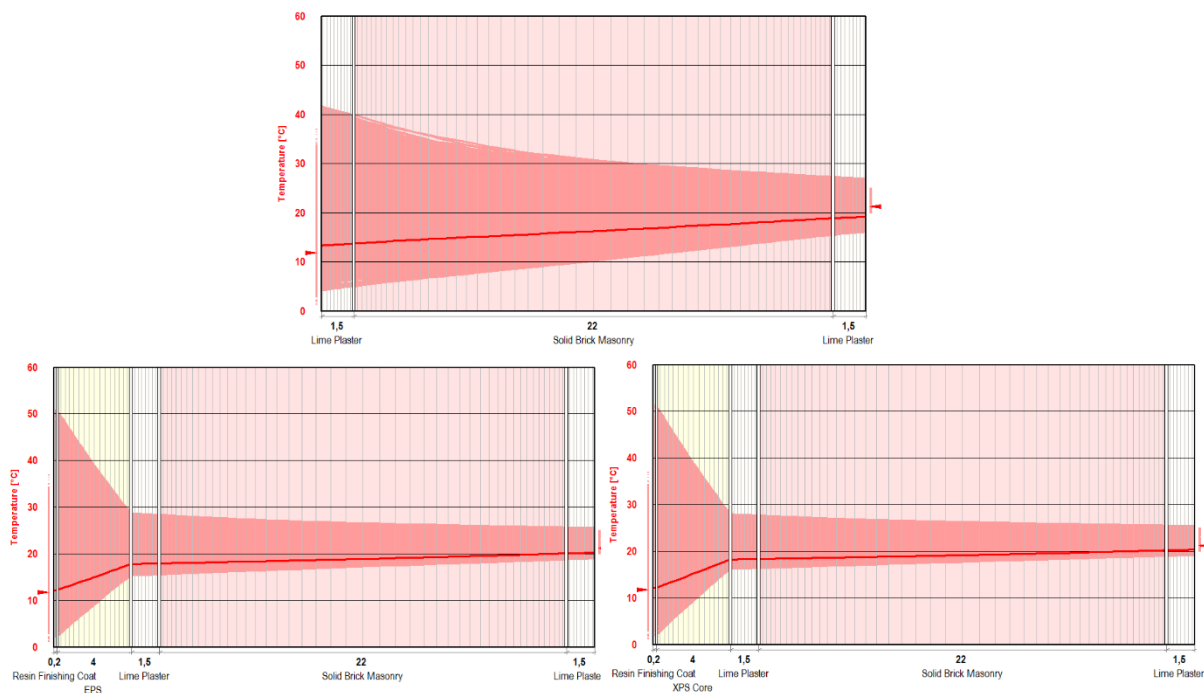


Fig. E.63 – Variação da temperatura para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces, figura retirada do WUFI®



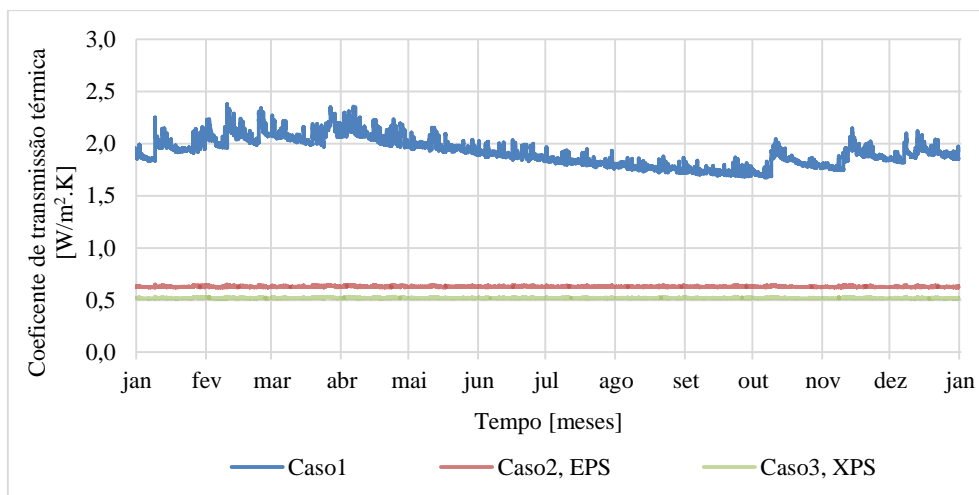


Fig. E.64 – Variação do coeficiente de transmissão térmica para o primeiro, o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tons de vermelho ou verde forte são indicativos de sobreposição

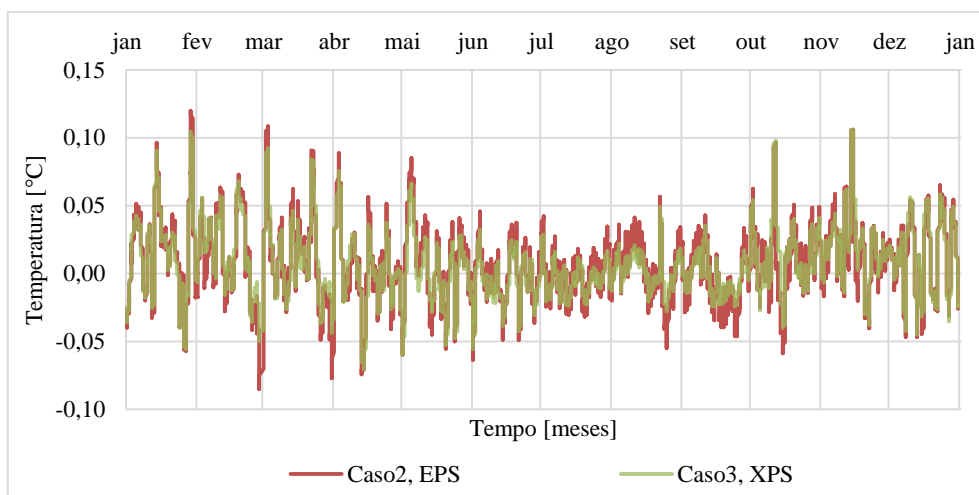


Fig. E.65 – Importância do efeito de evaporação em termos de temperatura para o segundo e o terceiro casos de estudo com reboco de cal em ambas as faces. Tons de verde forte são indicativos de sobreposição



## Anexo E.5. Estudo sobre a variação do coeficiente de transmissão térmica

### Aumento da espessura da camada tijolo maciço

Quadro E.9 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com 22, 34 e 25 centímetros de espessura

Caso de estudo	Espessura do tijolo maciço			
	$U_{\text{ITE}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{WUFI}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{MÉDIO}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	Aumento
1 vez	2,174	1,817	2,172	19,5%
1½ vezes	1,639	1,333	1,726	29,5%
2 vezes	1,316	1,071	1,453	35,7%

### Reboco pelo exterior, interior e em ambas as faces

Quadro E.10 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com reboco exterior

Caso de estudo	Reboco pelo exterior			
	$U_{\text{ITE}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{WUFI}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{MÉDIO}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	Aumento
LP	2,121	1,749	1,984	13,5%
LCP	2,089	1,757	1,850	5,3%
CP	2,121	1,776	1,801	1,4%

Quadro E.11 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com reboco interior

Caso de estudo	Reboco pelo interior			
	$U_{\text{ITE}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{WUFI}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{MÉDIO}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	Aumento
LP	2,121	1,749	2,103	20,3%
LCP	2,089	1,757	2,138	21,7%
CP	2,121	1,776	2,210	24,4%

Quadro E.12 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com reboco exterior e interior

Caso de estudo	Reboco pelo exterior e interior			
	$U_{\text{ITE}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{WUFI}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	$U_{\text{MÉDIO}} [\text{W/m}^2.\text{K}]$	Aumento
LP	2,070	1,685	1,921	14,0%
LCP	2,010	1,701	1,800	5,8%
CP	2,070	1,738	1,764	1,5%

### Isolamento térmico pelo interior

Quadro E.13 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo interior e reboco de cal

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo interior – Reboco de cal			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,652	0,604	0,652	7,9%
MW	0,652	0,604	0,639	5,7%
ICB	0,703	0,604	0,643	6,5%
XPS	0,620	0,503	0,539	7,3%

Quadro E.14 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo interior e reboco de cal e cimento

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo interior – Reboco de cal e cimento			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,646	0,606	0,626	3,3%
MW	0,646	0,606	0,623	2,8%
ICB	0,696	0,606	0,624	3,0%
XPS	0,614	0,504	0,521	3,3%

Quadro E.15 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo interior e reboco de cimento

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo interior – Reboco de cimento			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,652	0,611	0,616	0,9%
MW	0,652	0,611	0,616	0,9%
ICB	0,703	0,611	0,616	0,9%
XPS	0,620	0,507	0,511	0,8%

### Isolamento térmico pelo exterior

Quadro E.16 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo exterior e reboco de cal

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo exterior – Reboco de cal			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,673	0,626	0,629	0,4%
XPS	0,638	0,518	0,520	0,3%

Quadro E.17 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo exterior e reboco de cal e cimento

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo exterior – Reboco de cal e cimento			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,666	0,629	0,631	0,4%
XPS	0,632	0,520	0,521	0,3%

Quadro E.18 – Coeficiente de transmissão térmica: ITE, WUFI, e MÉDIO; e aumento do  $U_{\text{MÉDIO}}$  em relação ao  $U_{\text{WUFI}}$  para os casos com IT pelo exterior e reboco de cimento

Caso de estudo	Isolamento térmico pelo exterior – Reboco de cimento			
	$U_{\text{ITE}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{WUFI}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	$U_{\text{MÉDIO}}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Aumento
EPS	0,673	0,634	0,635	0,2%
XPS	0,638	0,523	0,524	0,1%



## **Anexo F – Demonstrações matemáticas**





#### Anexo F.1. Demonstração da relação entre o teor de água de saturação e o teor de água máximo

A equação que descreve a *curva de armazenamento de humidade* tem de compreender o valor de *teor de água inicial* e o valor de *teor de água máximo*. A um valor de humidade relativa nulo está associado um teor de água nulo, o que implica, e tendo em conta a equação 4.5, que a constante  $c$  seja obtida a partir da seguinte relação:

$$c = -\frac{a}{b} \quad \text{F.1}$$

Assume-se 1,0105 como o valor da constante  $b$ . De modo a ser possível recorrer à equação de transporte de humidade é necessário que a cada valor de teor de água esteja associado um valor de humidade relativa. Este requisito implica que no domínio de super-saturação seja necessário que a humidade relativa varie entre 1 (valor associada ao *teor de água de saturação*) e 1,01 (valor associada ao *teor de água máximo*).

De acordo com 4.1.1.2 é possível estimar o valor de *teor de água máximo* a partir do valor da *porosidade*, e para tal apenas é necessário multiplicar a *porosidade* pela massa volúmica da água. A partir da equação 4.5, e tendo em conta esta relação e o valor da constante  $c$  é possível obter a seguinte equação:

$$w_{\max} = \frac{a}{(b - \varphi_{\max})} - \frac{a}{b} \quad \text{F.2}$$

O valor da constante  $a$  é obtido rearranjando a equação F.2:

$$a = \frac{w_{\max} \times b \times (b - \varphi_{\max})}{\varphi_{\max}} \quad \text{F.3}$$

Considerando a equação 4.5 e o valor da constante  $c$  obtém-se:

$$w(\varphi) = \frac{a}{(b - \varphi)} - \frac{a}{b} \quad \text{F.4}$$

Ao somar ambos os termos da equação F.4 obtém-se:

$$w(\varphi) = \frac{a \times \varphi}{(b - \varphi) \times b} \quad \text{F.5}$$

Ao substituir na equação F.5 o valor constante  $a$  (i.e. equação F.3) obtém-se:

$$\frac{w(\varphi)}{w_{\max}} = \frac{\varphi}{(b - \varphi)} \cdot \frac{(b - \varphi_{\max})}{\varphi_{\max}} \quad \text{F.6}$$

Tendo em conta que ao *teor de água de saturação* corresponde uma humidade relativa unitária, que se assume 1,0105 como o valor da constante  $b$  e que ao *teor de água máximo* corresponde um valor de humidade relativa de 1,01 obtém-se:

$$w_{\text{sat}} \approx 0,047 \cdot w_{\max} \quad \text{F.7}$$

## Anexo F.2. Demonstração do cálculo da espessura da camada de isolamento térmico

Uma vez que são conhecidos os valores de *coeficiente de transmissão térmica de referência* (i.e. 0,50 W/m<sup>2</sup>.K) e de *coeficiente de transmissão térmica máximo* (i.e. 1,75 W/m<sup>2</sup>.K) o cálculo da espessura do isolamento térmico para uma reabilitação térmica interior é efectuada invertendo o processo de cálculo de um *coeficiente de transmissão térmica*.

O cálculo da espessura da camada de isolamento térmico para o elemento construtivo em questão é efectuado recorrendo à seguinte equação:

$$s_{IT} = (1 - U \cdot (R_{se} + R_{CP} + R_{Tij} + R_{CP} + R_{GC} + R_{si})) \cdot \frac{\lambda_{IT}}{U} \quad \text{F.8}$$

Onde,

- $s_{IT}$  Espessura da camada de isolamento térmico [m];
- $U$  Coeficiente de transmissão térmica de referência/máximo [W/m<sup>2</sup>.K];
- $R_{se}$  Resistência térmica superficial exterior [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{CP}$  Resistência térmica da camada de reboco [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{Tij}$  Resistência térmica da camada de tijolo maciço [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{GC}$  Resistência térmica da camada de gesso cartonado [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{si}$  Resistência térmica superficial interior [m<sup>2</sup>.K/W];
- $\lambda_{IT}$  Condutibilidade térmica da camada de isolamento térmico [W/m.K].

De notar que a equação F.8 foi obtida a partir da relação entre o *coeficiente de transmissão térmica* e a *resistência térmica total*, e das definições da *resistência térmica total* e da *resistência térmica*.

A relação entre o *coeficiente de transmissão térmica* e a *resistência térmica total*:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{F.9}$$

Onde,

- $U$  Coeficiente de transmissão térmica de referência/máximo [W/m<sup>2</sup>.K];
- $R_T$  Resistência térmica total [m<sup>2</sup>.K/W].

O cálculo da *resistência térmica total* de um elemento construtivo é efectuado recorrendo à seguinte equação:

$$R_T = R_{se} + \sum R + R_{si} \quad \text{F.10}$$

Onde,

- $R_T$  Resistência térmica total [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{se}$  Resistência térmica superficial exterior [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R$  Resistência térmica de camada i [m<sup>2</sup>.K/W];
- $R_{si}$  Resistência térmica superficial interior [m<sup>2</sup>.K/W].

O cálculo da *resistência térmica* de uma camada de material é efectuado recorrendo à seguinte equação:

$$R = \frac{s}{\lambda} \quad \text{F.11}$$

Onde,

- $R$  Resistência térmica de camada i [m<sup>2</sup>.K/W];
- $s$  Espessura da camada i [m];
- $\lambda_{IT}$  Condutibilidade térmica da camada i [W/m.K].

### Anexo F.3. Demonstração do cálculo da altitude mínima na Grande Lisboa para I2

Uma vez que o número de graus-dias que separa a zona climática de Inverno I1 e I2 é 1300 °C [8] e é possível calcular a altitude que separa as duas zonas a partir da equação 1 do Despacho (extracto) n.º 15793-F/2013 [8] em função da altitude de referência, do número de graus-dias de referência e do declive para a *Grande Lisboa*:

$$z = z_{ref} + \frac{(GD - GD_{ref})}{a} \quad \text{F.12}$$

Onde,

$z$         Altitude [km];

$z_{ref}$      Altitude de referência [km];

$GD$        Número de graus-dias [°C];

$GD_{ref}$    Número de graus-dias de referência [°C];

$a$         Declive [°C/km].

Os valores da altitude de referência (i.e. 0,109 km), do número de graus-dias de referência (i.e. 1071 °C) e do declive (i.e. 1700 °C/km) para a *Grande Lisboa* são retirados da Tabela 04 do Despacho (extracto) n.º 15793-F/2013 [8].

